



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A  
ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
ENGINEERING

## ZALÉVACÍ HMOTY PRO VÝKONOVOU ELEKTRONIKU

POTTING COMPOUNDS FOR POWER ELECTRONICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DAVID ŠTAJNER

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ADAM VAŠÍČEK

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

**Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

**Student:** David Štajner

**ID:** 125660

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2013/2014

**NÁZEV TÉMATU:**

**Zalévací hmoty pro výkonovou elektroniku**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s dostupnými druhy zalévacích hmot a jejich základními vlastnostmi.
2. V součinnosti s vedoucím práce vypracujte metodiku a navrhnete přípravy pro ověření reálných vlastností různých hmot.
3. Vyhodnoťte jednotlivé hmoty z hlediska jejich vhodnosti pro zalévání obvodů a prvků výkonové elektroniky.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] FLICK, Ernest W. Epoxy resins, curing agents, compounds, and modifiers: an industrial guide. 2nd ed. Park Ridge, N.J., U.S.A.: Noyes Publications, 1993, xxii, 519 p. ISBN 08-155-1322-4.
- [2] LICARI, James J. Coating materials for electronic applications: polymers, processes, reliability, testing. Norwich: William Andrew Publishing, 2003, 531 s. ISBN 08-155-1492-1.

**Termín zadání:** 27.9.2013

**Termín odevzdání:** 2.6.2014

**Vedoucí práce:** Ing. Adam Vašíček

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Zalévací hmoty jsou v elektrotechnice často používaným materiálem, který elektrotechniku chrání před nepříznivými vlivy, zlepšuje její izolační vlastnosti a napomáhá lepšímu odvodu tepla z oblasti zalitých součástek do okolí. Zalitím elektroniky do zalévací hmoty rozšíříme oblast použitelnosti. Takovou elektroniku pak můžeme používat v mokřém, prašném či jiném agresivním prostředí.

## **Abstract**

Potting compounds are often used in electrotechnics to protect the electronics from the adverse effects, improves its insulating properties and helps to improve the heat transfer from the embedded devices in the surroundings. Embedding electronics into encapsulants extend the field of application. Such electronics can then be used in wet, dusty, corrosive or otherwise harsh environments.

**Klíčová slova**

zalévací hmota; silikon; polyuretan; polybutadien; pryskyřice; epoxid

**Keywords**

encapsulants, silicone, polyurethane, polybutadiene, resin, epoxy

## **Bibliografická citace**

ŠTAJNER, D. *Zalévací hmoty pro výkonovou elektroniku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 66 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Adam Vašíček.

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Zalévací hmoty pro výkonovou elektroniku jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

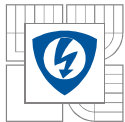
Podpis autora .....

## Poděkování

Děkuji Dr. Ivu Běhůnkovi z firmy SYNFLEX, za poskytnutí vzorků všech měřených polyuretanů, dále panu Ing. Tomáši Bravenému z firmy INTERCONTI, za poskytnutí vzorků měřených silikonů. Také svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Adamu Vašíčkovi za odborné konzultace.

V Brně dne 2.6.2014

Podpis autora .....



## Obsah

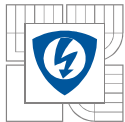
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	7
SEZNAM TABULEK .....	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
ÚVOD.....	10
1 ZALÉVACÍ HMOTY A JEJICH POUŽITÍ .....	10
2 DRUHY ZALÉVACÍCH HMOT.....	11
2.1 POLYURETANY PU .....	12
2.2 EPOXIDY .....	14
2.2.1 IMPREGNAČNÍ LAKY .....	14
2.2.2 PRYSKYŘICE .....	15
2.3 POLYBUTADIENY.....	16
2.4 SILIKONY .....	16
2.4.1 KONDENZAČNÍ SILIKONY.....	16
2.4.2 ADIČNÍ SILIKONY .....	18
3 KONTROLA A ZPŮSOBY IMPREGNOVÁNÍ.....	19
3.1 KONTROLA VIZKOZITY .....	19
3.2 ZPŮSOBY IMPREGNOVÁNÍ.....	19
4 POŽADAVKY KLADENÉ NA VÝBĚR ZALÉVACÍ HMOTY .....	21
4.1 PŘEHLED POŽADAVKŮ KLADENÝCH NA ZALÉVACÍ HMOTY A ROZSAH JEJICH TYPICKÝCH HODNOT .....	21
5 MĚŘENÍ OTEPLOVACÍCH CHARAKTERISTIK.....	23
5.1 NAVRŽENÝ MĚŘICÍ PŘÍPRAVEK .....	25
5.1.1 NASTAVENÍ PI REGULÁTORU.....	28
5.1.2 MĚŘENÉ ZALÉVACÍ HMOTY .....	29
5.1.3 PRŮBĚH MĚŘENÍ.....	32
5.1.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	34
6 ZÁVĚR.....	35
POUŽITÁ LITERATURA .....	36
PŘÍLOHY .....	37



## SEZNAM OBRÁZKŮ

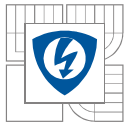
<i>Obr. 1 Dělení zalévacích hmot.....</i>	<i>11</i>
<i>Obr. 2: Stupnice tvrdosti zalévacích hmot .....</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 3 VN izolátor a MT napětí oba zality v polyuretanu [4].....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 4 Rotory motorků impregnované pryskyřicí[5] .....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 5 Silikonová zalévací hmota [1] .....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 6 Impregnace rotoru vakuovou metodou .....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 7 Impregnace rotoru metodou zakapávání .....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 8: Rozměry vzorku zalévací hmoty (Rozměry v mm) .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 9: Termistor připraven k zalití hmotou.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 10 Schéma zapojení měřícího přípravku.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 11: Přejíhová charakteristika PI regulátoru.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 12: Pracovní cyklus měřícího přípravku.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 13: Měřící pracoviště.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 14 Deska plošného spoje měřícího přípravku (rozměr 64x53mm) .....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 15 Osazovací výkres desky plošného spoje měřícího přípravku.....</i>	<i>38</i>





## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Druhy vytvrzovacích systémů [1] .....</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 2: Výhody a nevýhody kondenzačních silikonů [1] .....</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 3: Výhody a nevýhody adičních silikonů [1] .....</i>	<i>18</i>
<i>Tab. 4: Zpracování zalévací hmoty ve výrobním procesu [2] .....</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 5: Vlastnosti zalévací hmoty po smísení nebo aplikaci [2] .....</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 6: Fyzikální vlastnosti zalévací hmoty po vytvrzení [2] .....</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 7 Hodnoty konstant, ze kterých je proveden přepočet [9] .....</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 8: Polyuretan 390 od výrobce VEVO .....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 9 Polyuretan 403 FL od výrobce VEVO .....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 10 Polyuretan 512FL od výrobce VEVO .....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 11 Polyuretan 552 FL od výrobce VEVO .....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 12 Polyuretan 7210 FL od výrobce VEVO .....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 13 Polyuretan VU 4445 od výrobce PETERS .....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 14 Silikon VT 3602 KK od výrobce PETERS .....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 15 Organo-poly-syloxan od výrobce PETERS .....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 16: Zalévací hmoty seřazeny podle tepelné vodivosti .....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 17: Zalévací hmoty seřazeny podle tepelné kapacity .....</i>	<i>34</i>



## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

RTV	Room Temperature Vulcanising – vytvrzování při pokojové teplotě
A/D	Analogově digitální vstup
D/A	Digitálně analogový výstup
PI	Proporciálně integrační regulátor
P	Proporciální složka
I	Integrační složka
$P_R$	Skutečný výkon termistoru
$U_X$	Akční veličina napětí
$R_T$	Odpor termistoru
$R_{Zmax.}$	Maximální zatěžovací odpor
$e$	Regulační odchylka
NTC	Negative Temperature Coefficient – záporný teplotní koeficient
$T$	Teplota termistoru
$U_{2max}$	Maximální výstupní napětí
USB	Universal Serial Bus – univerzální sériová sběrnice
CSV	Comma-separated values – hodnoty oddělené středníkem
C#	C Sharp – programovací jazyk
EXE	Executable – spustitelný
$\kappa$	Překmit PI regulátoru
$P_x$	Žádaná hodnota výkonu
$P_{max}$	Maximální špička výkonu

## ÚVOD

úkolem této práce je shrnout poznatky o druzích zalévacích hmot a jejich použití ve výkonové elektronice. Na trhu existuje mnoho výrobců a druhů zalévacích hmot. Každý druh hmoty má své specifické vlastnosti a je vhodný pro použití v určitém prostředí. V následujícím textu jsou uvedeny druhy zalévacích hmot a jejich vlastnosti.

## 1 ZALÉVACÍ HMOTY A JEJICH POUŽITÍ

Pod pojmem zalévací hmota si můžeme představit látku, která je ve většině případů nejprve v kapalném stavu a následně po aplikaci změny své skupenství za určitou dobu vytvrzení na pevné. Takovouto hmotu používáme pro ochranu částí elektroniky před nepříznivými vlivy prostředí, jako je například vlhkost, agresivní plyny a kapaliny, vodivý prach a pod. Zalévací hmota zlepšuje mechanickou odolnost zalité elektroniky a ideálně také odvod tepla.

Konkrétně zalévací hmoty používáme například pro zalévání transformátorů, kde je klasický transformátor s plechovým jádrem vložen do krabičky a následně zalit hmotou tak, že zůstanou mimo hmotu jen přípojovací kontakty. Takovýto transformátor je tak kompletně chráněn před mechanickým poškozením, zalévací hmota zlepšuje odvod tepla a při použití speciálních příměsí je samozhášivá. Zalévají se také toroidní transformátory, u kterých dojde k zalití středu transformátoru, ve kterém se po vytvrzení vyvrtá díra, která slouží k uchycení transformátoru při montáži do přístroje. Toroidní transformátory se zalévají i komplet celé, zalévací hmota zlepšuje odvod tepla a především elektroizolační vlastnosti.

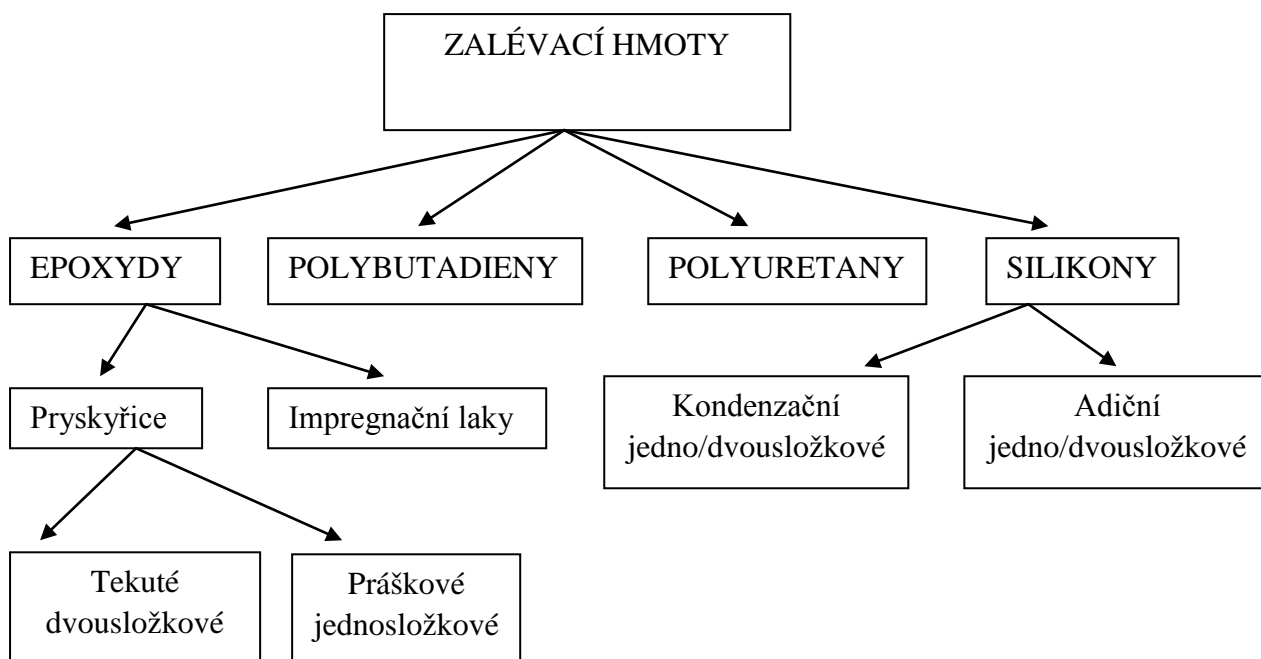
Zalévací hmoty se také používají u motorů, kde se jak stator, tak rotor zalije vhodným epoxidem nebo polyuretanem. Zlepší se tím odvod tepla a motor je tak chráněn před vlhkostí, jeho vinutí je díky zalévací hmotě zpevněno a hmota jej také chrání před mechanickým poškozením izolace vinutí. Trakční motory bývají pro zvýšení mechanické, chemické i přepětové odolnosti po zalití ještě pokrývány vrstvou zvláště odolné pryskyřice. Speciální případy tvoří motory pro čerpadla vody, splaškové vody nebo vody v kanalizaci, kde se stator zalije do speciální hmoty, která motor následně chrání před vlhkostí, reakcí s agresivními kyselinami a plyny, které v tomto prostředí vznikají. Motor pracuje částečně zaplaven čerpanou kapalinou, což výrazně zlepší jeho chlazení. Výhodou dále je, že takovýto motor už nemusí mít žádné dodatečné IP krytí.

Hmoty se také používají pro zalévání drobné elektroniky, jako jsou plošné spoje, u kterých potřebujeme elektroniku chránit před mechanickým poškozením, zlepšit odvod tepla, isolační vlastnosti a elektroniku tak připravit na prostředí ve kterém má být použita. Např. využití v automobilové technice, kde dochází ke styku s agresivními látkami, jako jsou oleje, prach, v zimě sůl z posypu apod. Taková elektronika se zalévá opět do speciálních polyuretanů, které následně elektroniku chrání.

## 2 DRUHY ZALÉVACÍCH HMOT

Zalévací hmoty jsou ve většině případů dvousložkové, méně pak jednosložkové. Dvousložkovou hmotou se rozumí to, že obě složky - hmotu a tvrdidlo, je třeba před aplikací smíchat ve výrobcem doporučeném poměru. Tím vznikne zalévací hmota, která má omezenou dobu zpracovatelnosti. Omezená doba zpracovatelnosti znamená, že smícháním hmoty s tvrdidlem, dochází za určitou dobu k vytvrzování materiálu.

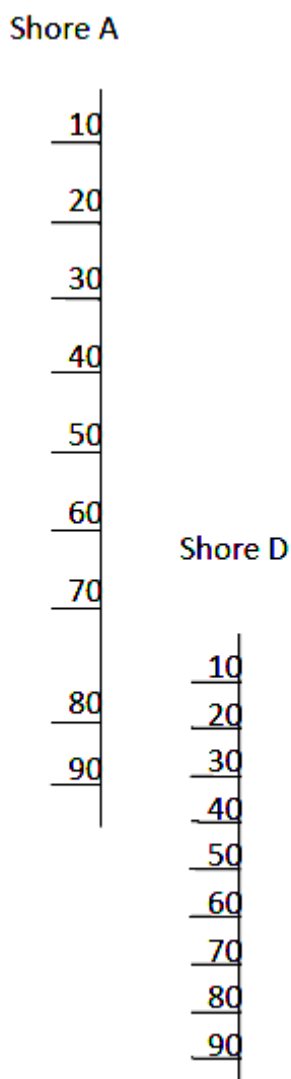
Při smíchání hmoty a tvrdidla dochází u polyuretanů a epoxidů k exotermické reakci. U epoxidů je hmota schopná se zahřát na 120°C, u polyuretanů je exotermie nižší (cca 70°C) a u polybutadienů není žádná. Tuto exotermickou reakci musíme vzít v úvahu, hlavně při zalévání citlivé elektroniky, součástky by se totiž mohly vlivem vysoké teploty zničit. Při míchání zalévací hmoty je důležité dodržovat mísící poměry co nejpřesněji. Pokud mísící poměry dodržíme zcela přesně, tak v ideálním případě se při vytvrzení v celém objemu vytvoří jedna jediná molekula. Pokud bychom při míchání dodali méně tvrdidla než je předepsané množství, vytvoří se ve směsi více menších molekul, a to je nežádoucí. Na venek se materiál sice chová stejně jako při ideálním smísení, ale po provedení měření bychom zjistili, že materiál má jiné vlastnosti a to prakticky vždy horší, než uvádí výrobce. Pokud bychom naopak přidali tvrdidla více, vznikly by volné izokyanáty, které reagují s okolním prostředím a hmota má buď hrudkovitý povrch, nebo může i zvětšit objem – „nakynout“. Problémy s přesným namícháním se v současné době řeší strojově, kdy namíchání provede naprogramovaný automat. Tuto technologii si však díky vysoké ceně nemohou dovolit menší firmy. Po smíchání složek je stanovena určitá doba zpracovatelnosti namíchané zalévací hmoty, na ni navazuje doba želatinace. K úplnému vytvrzení dojde ale až po několika týdnech a k vyvržení po několika měsících. Konkrétní doby závisí na použitém druhu zalévací hmoty a teplotě okolí.



Obr. 1 Dělení zalévacích hmot

## 2.1 Polyuretany PU

Použití polyuretanů je univerzální, existuje mnoho typů, kterými lze pokrýt široké spektrum aplikací. Mají dobré dielektrické vlastnosti, vysokou teplotní odolnost běžně do 120°C ale existují i speciální typy do 160°C. Mají velmi dobrou přilnavost k ostatním materiálům. V důsledku smrštění vyvíjí malý tlak na zalité komponenty, neabsorbují vodu, mají velkou chemickou odolnost. Mají nízkou viskozitu i při pokojových teplotách, takže odpadá přehřívání komponent a také udržování určité teploty okolí. Na rozdíl od epoxidů nejsou hodnoceny jako nebezpečný odpad. U zalévací hmoty je důležitá tuhost materiálu, polyuretany existují od měkkých materiálů (tvrdost gumy) až po materiály které jsou tvrdé jako epoxid. Tvrdost je důležitá vlastnost a označuje se stupnicí shore. Stupnice shore A (silikony), tvrdost od 10 po 90 a stupnice shore D (tvrdé materiály epoxidy) tvrdost opět 10 až 90 s tím, že se tyto dvě stupnice překrývají shore A 80-90 odpovídá shore D 20-30. Na měření se používá shore A nebo shore D metr, který měří pomocí jehly tvrdost materiálu.



Obr. 2: Stupnice tvrdosti zalévacích hmot

Polyuretany nejsou tak emisně agresivní jako epoxidy, proto pracoviště s polyuretany je daleko příjemnější pro pracovníky. Při skladování se musí jak složka hmoty, tak tvrdidlo uchovávat mimo dosah vlhkosti a také mimo teploty pod 5°C. Při vystavení tvrdidla teplotám nižším než 5°C, by se začaly tvořit krystaly a došlo by k jeho znehodnocení. Před použitím se hmota musí kontrolovat, jestli byla dobře rozmíchána, protože při dlouhodobém skladování vznikají usazeniny. Kontrola probíhá pomocí piktometru (objemově normovaného kalíšku) a váhy, kdy se rozmíchaná hmota vlije do kalíšku, následně zváží a vypočte se hustota  $\rho$  [kg.m<sup>-3</sup>] která se následně porovnává s údaji z katalogového listu.

Používají se v oblasti nízkého až vysokého napětí pro zapouzdřování transformátorů, optických prvků, ponorných čerpadel a odrušovacích filtrů.



Obr. 3 VN izolátor a MT napětí oba zality v polyuretanu [4]

## 2.2 Epoxidy

Jsou dobře chemicky, mechanicky a tepelně odolné. Většinou jsou to tvrdé látky tvrdosti shore D 80-90 . Používají se v náročných aplikacích, kde dochází k dlouhodobému působení vyšších teplot, také vyššího napětí a chemicky agresivním prostředí. Při vytvrzování narůstá teplota a klesá viskozita (zalévací hmota je více tekutá) jakmile dojde k želatinaci hmoty tak prudce viskozita stoupne. To může vést ke vzniku značného mechanického napětí mezi zalitými součástkami a postupem času vlivem vibrací materiál začne prskat. Jejich emise jsou chemicky agresivní. Jejich použití je obdobné jaké u polyuretanů, maximální doporučená provozní teplota je 155°C.

### 2.2.1 Impregnační laky

Impregnační laky se používají pro impregnaci vinutí motorů, transformátorů a cívek. Impregnace slouží jako ochrana před chemickými vlivy, prachem, vlhkostí, zlepšuje odvod tepla a mechanicky zpevňuje vinutí. Impregnované stroje jsou tak méně náročné na údržbu, impregnací se zvyšuje jejich spolehlivost a také možnost použití v extrémních podmínkách.

Impregnace lakem se provádí namáčením, stříkáním nebo vakuotlakově. Namáčení se ve většině případů provádí dvakrát. Lak je totiž dobře těkavý a po vytažení impregnovaného prvku vznikají velké okapové ztráty, ve vinutí zůstává pouze 20-30% impregnačního laku. Proto impregnaci opakujeme a to tak, že impregnujeme jednou, necháme vytvrdit, impregnujeme podruhé a opět necháme vytvrdit. Impregnace stříkáním je prováděna většinou ručně za pomoci stříkácí pistole. Vakuotlaká impregnace je prováděna za pomoci dvou nádob v jedné se nachází impregnační lak a ve druhé je impregnované vinutí. V nádobě ve které se nachází vinutí, je vytvořeno odsátím vzduchu vakuum. Následně je do nádoby zespodu vpuštěn impregnační lak. Po jejím napuštění se do nádoby vpustí vysoký tlak, který napomáhá laku lepšímu proniknutí do vinutí. Dále je lak odčerpán zpět do druhé nádoby, vinutí se nechá okapat a vytvrdí se ve vytvrzovací peci. Vytvrzení probíhá ve vytvrzovací peci při cca 150°C, kdy se část rozpouštědla odpaří a druhá část rozpouštědla se sušinou polymerizuje (tuhne) a vytváří pevné molekuly.

Kvalitou impregnace rozumíme, kolik laku se dostalo do vinutí. Vyhodnocování se provádí pomocí váhového přírůstku, kdy se impregnovaný výrobek zváží před impregnací a po impregnaci a následně se vyhodnotí, kolik gramů impregnačního laku se mezi jednotlivé vrstvy vinutí podařilo dostat. Hodnotit se dá také vizuálně, kdy se naimpregnované vinutí rozřízne a následně se mikroskopem pozorují vzduchové mezery. Takovouto kontrolu ale provádíme na pokusných dílech, abychom věděli, jestli máme impregnační stroj dobře nastaven. Důležitost na kvalitní impregnaci klademe hlavně kvůli ochraně před vznikem korózy.



## 2.2.2 Pryskyřice

Používají se v automobilovém průmyslu, elektronice, elektrotechnice a telekomunikačním průmyslu. Mohou sloužit jako mechanická ochrana, izolace, ochrana proti vlhkosti a vlivům prostředí. Pryskyřice jsou neporézní (v jejich objemu se nevytvářejí póry), rychle se vytvrzují, mají dobré elektrické vlastnosti, jsou odolné proti teplotním a mechanickým šokům, mají dobrou přilnavost k ostatním materiálům.



*Obr. 4 Rotory motorků impregnované pryskyřicí[5]*

### 2.2.2.1 Pryskyřice tekuté dvousložkové

Jsou vhodné na ochranu elektrických komponent a také jejich zatěsňování proti vlhkosti. Mají jednoduchý poměr míchání pro bezproblémové zpracování a aplikaci. Dvousložkové pryskyřice mohou být epoxidové nebo polyuretanové a mohou být vytvrzované pokojovou teplotou nebo za tepla. Pryskyřice vytvrzované za tepla jsou více univerzální, protože mají lepší zpracovatelnost a lépe se u nich kontroluje viskozita. U obou druhů je možnost použití plnidel. Pryskyřici bez plnidel použijeme tam, kde požadujeme co nejlepší stékavost do hůře přístupných míst. Plnidla použijeme u aplikací, kde chceme redukovat „scvrkávání“ materiálu, požadujeme vyšší odolnost vůči teplotním šokům.

### 2.2.2.2 Pryskyřice práškové jednosložkové

Používají se jako drážková izolace menších elektromotorků. Dodávají se v předem namíchané práškové směsi, která zaručuje rovnoměrnou a homogenní aplikaci. Na impregnovanou část se nanáší ponořováním, ručním stříkáním a může být použito také elektrostatické naprašování.

Při použití pryskyřic bychom měli dodržovat určitá aplikační pravidla. Komponent by měl být dobře očištěný a odmaštěný. Při použití některých typů pryskyřic je nutné předežhřátí impregnovaných dílů, po předežhřátí se nanesená pryskyřice roztaví a částečně rozlije a tím je nanášena rovnoměrná vrstva.



## 2.3 Polybutadieny

Jejich vlastnosti se v širokém rozsahu teplot nemění. Používají se například v automobilové technice, pro zalévání tlakových senzorů v pneumatikách. Jsou to měkké materiály Shore A 30-70. Mají minimální smrštění a roztažnost. Jsou dobře chemicky odolné. Mají teplotu skelného přechodu kolem  $-50^{\circ}\text{C}$  až  $-60^{\circ}\text{C}$ . Je to taková teplota, při které látka ztrácí své krystalické vlastnosti, dochází k měknutí materiálu a skokově se zhoršují jeho parametry.

## 2.4 Silikony

Základní fyzikální vlastnosti:

- provozní teplota  $-115$  až  $+300^{\circ}\text{C}$
- výborné elektroizolační vlastnost
- tvrdost od měkkých gelů až po středně tvrdé pryže
- odolnost vůči UV záření
- dobrá chemická odolnost
- odolnost vůči vlhkosti a vodě
- nízká nebo žádná toxicita
- jednoduchost zpracování



Obr. 5 Silikonová zalévací hmota [1]

Základní vlastnosti můžeme dále vylepšit použitím plniv a aditiv pro různé požadované odolnosti např. odolnost vůči hoření, samozhášivost, vyšší tepelná vodivost, elektrickou vodivost a adhezi (přilnavost k jiným materiálům). Díky plnivům je také možno zvýšit či snížit viskozitu a hlavně teplotu vytvrzení. Můžeme totiž vytvořit systémy, které se vytvrzují za pokojové teploty, jsou označovány jako RTV (Room Temperature Vulcanising – vytvrzování při pokojové teplotě) nebo také systémy vytvrzující se za teploty zvýšené. Silikony jsou děleny na kondenzační a adiční. [1]

### 2.4.1 Kondenzační silikony

Jsou jednosložkové i dvousložkové. Jejich systém při vytvrzení využívá vzdušné vlhkosti z atmosféry. Režim vytvrzení nelze urychlit zvyšováním teploty, ba naopak nadměrné zvýšení teploty je škodlivé. Proto je nutné vytvrzení provádět v místnosti s málo kolísající teplotou. Je také potřeba mít na vědomí, že při vytvrzování vzniká malé množství zplodin. Je důležité, aby systém zůstal otevřený vůči okolní atmosféře, kvůli vytvrzení a také abychom zabránili reverzi. To znamená, že systém, který využívá pro vytvrzení organický cínový katalyzátor, by se mohl po hermetickém uzavření rozkládat a vracet ke své kapalné formě. Kondenzační silikony nelze použít pro zalévání vrstev vyšších jak 1cm, při zalití vyšší vrstvy by totiž došlo k tomu, že by vyšší vrstva, která rychleji ztuhne, bránila přísunu vlhkosti do nižší vrstvy a nedošlo by tak k úplnému vytvrzení.

Jednosložkový RTV	Riziková složka	Výsledek
Acetoxý	kyselina octová	korozivní
Oxymový	Ketoxym	mírně korozivní
Alkoxy	Metanol	nekorozivní
Acetonový	Aceton	nekorozivní, naleptává plasty

Tab. 1: Druhy vytvrzovacích systémů [1]

Pro vytvrzení jednosložkových kondenzačních silikonů se používá mnoho zesítujících katalyzátorů, ty mají za následek tvorbu vedlejších produktů, které mohou poškodit citlivou elektroniku. Je tedy vhodné pro zalévání citlivých součástek používat spíše „Alkoxy“ a „Acetonové“ jednosložkové silikoný. [1]

VÝHODY	NEVÝHODY
<b>Jednosložkové</b>	
není nutno míchat - tím odpadá chyba nesprávného poměru	při hermetickém uzavření návrat k tekutému stavu
pro dávkování se používají tuby nebo zásobníky	pevně dané doby vytvrzení
	vrstva maximálně do 10mm
	omezení ve viskozitě
<b>Dvousložkové</b>	
mohou být použity ve velkých vrstvách	velký limit smrštění
poměr katalyzátoru má určitou toleranci	pokud dojde k zahřátí v uzavřené nádobě, tak se vrátí do tekutého stavu
možnost použití urychlovače vytvrzení	

Tab. 2: Výhody a nevýhody kondenzačních silikonů [1]

## 2.4.2 Adiční silikony

Jsou jednosložkové i dvousložkové. Pro své vytvrzení používají platinový katalyzátor. Při vytvrzení nevytváří žádné vedlejší zplodiny. Není nutné, aby byly otevřeny kvůli vytvrzení vůči atmosféře, k vytvrzení totiž dojde i při hermetickém uzavření. U dvousložkových silikonů je možné použít zvýšené teploty pro vytvrzení, bez jakýchkoliv vedlejších negativních dopadů, ale k jejich vytvrzení dojde i při pokojové teplotě. U jednosložkových adičních silikonů je nutné použít zvýšenou teplotu.

Použitý platinový katalyzátor je nutné chránit před stykem s některými chemickými sloučeninami a prvky (síra, dusík, fosfor atd.). Styk s těmito sloučeninami vede k negativním jevům při vytvrzování, zejména k neúplnému vytvrzení materiálu. Před mísením je nutné každou složku zvlášť dobře promíchat a při mísení materiálu je nutné dodržet přesný poměr smíchání obou složek, kvůli přesné chemické rovnováze. [1]

VÝHODY	NEVÝHODY
<b>Jednosložkové</b>	
není nutno míchat - tím odpadá chyba nesprávného poměru	nutno použít zvýšenou teplotu pro vytvrzení
může být použita tenká i silná vrstva zalití	hůře dosahují spojení s jinými materiály
dobrá mechanická pevnost	omezená doba použitelnosti
<b>Dvousložkové</b>	
mohou být použity ve velkých vrstvách	nutnost přesného poměru smíchání
pomocí aditiv můžeme zvýšit dobu zpracovatelnosti	hůře dosahují spojení s jinými materiály
mohou být hermeticky uzavřeny	
tuhnutí lze urychlit zvýšením teploty	
málo se smršťují	
mohou být i průhledné	

Tab. 3: Výhody a nevýhody adičních silikonů [1]

## 3 KONTROLA A ZPŮSOBY IMPREGNOVÁNÍ

### 3.1 Kontrola viskozity

Viskozita se udává v jednotkách mPa.s, tuto jednotku však často nejsou firmy schopny měřit, a proto se viskozita kontroluje pomocí tzv. výtokového času. Ten se měří pomocí normovaného kalíšku s dírkou ve dně, kalíšek se nabere plný impregnační hmoty a následně se měří výtokový čas [ s ] (za jak dlouho hmota z kalíšku vyteče). Na různé hustoty hmot se využívají různé kalíšky, které se liší pouze velikostí díry ve dnu. V Evropě se používá normovaných kalíšků DINA4, DINA6, DINA8. Výtokový čas se pomocí normovaných tabulek převede na viskozitu. Viskozita se mění s teplotou, tuto hodnotu je také nutno vzít v úvahu při kontrole.

### 3.2 Způsoby impregnování

- **Máčení**

Impregnovaný díl se ponoří do nádoby s impregnací, následně se vyjme a nechá okapat. Po okapu díl putuje většinou do vytvrzovací pece.

Využívá se také možnosti zaplavení, kdy je díl umístěn v prázdné nádobě, do které se zespodu napouští impregnant. Stoupající impregnant vytlačuje vzduch z mezer v dílci a minimalizuje tak vznik bublin.

- **Stříkání**

Provádí se ručně pomocí stříkací pistole nebo také na automatizované lince.

- **Natírání**

Pomocí štětce nebo impregnačních houbiček.

- **Zakapávání**

Tento způsob se používá při impregnaci rotorů. Impregnační pryskyřice kape na okraje předeřtátého rotoru, uplatní se jev kapilarity, kdy se impregnační látka „nasaje“ mezi jednotlivé vodiče vinutí rotoru.

- **Vakuová impregnace**

Dvě nádoby v jedné je umístěn výrobek a ve druhé impregnant, v nádobě s výrobkem vytvoříme vysátím vzduchu vakuum a následně zespod zaplavíme impregnantem. Jakmile je výrobek zaplaven, vakuum přerušíme a vpustíme do nádoby atmosferický tlak, který nám napomůže k lepšímu zaimpregnování. Následně se impregnační hmota odčerpá, výrobek se nechá okapat a v peci se vytvrdí.

- **Zalévání**

Díl je vložen do krabičky a následně zalit hmotou, která je většinou vytvrzována při pokojové teplotě. Tento způsob se používá při zalévání přístrojových transformátorů nebo zalévání čidel v automobilové technice.



*Obr. 6 Impregnace rotoru vakuovou metodou*



*Obr. 7 Impregnace rotoru metodou zakapávání*

## 4 POŽADAVKY KLADENÉ NA VÝBĚR ZALÉVACÍ HMOTY

### Jaké parametry zalévací hmoty nás zajímají?

- Mísící poměr hmotnostní nebo objemový
  - Hustota směsi
  - Viskozita směsi (jak dobře nebo špatně materiál teče)
  - Mechanické vlastnosti (pevnost v tahu, modul pružnosti, modul pevnosti)
  - Teplota skelného přechodu
  - Teplotní třída materiálu
  - Tepelná vodivost
  - Hořlavost
  - Teplotní index (z hlediska životnosti)
- Je udána teplota, kterou zalévací hmota vydrží při 20 000h
- Permittivita závislá na frekvenci

### Jak vybrat vhodný materiál pro zalévání

- Kde se bude dané zařízení používat
- Jaké budou vlivy vnějšího prostředí
- Požadavky na tepelnou odolnost
- Požadavky na tuhost a pružnost daného materiálu

### 4.1 Přehled požadavků kladených na zalévací hmoty a rozsah jejich typických hodnot

Parametr	Jednotka	Rozsah typických hodnot	Poznámka
Dynamická viskozita	[mPa.s]	100 až 300 000	důležité z hlediska míchání a dávkování
Počet složek	[-]	1 až 3	důležité z hlediska míchání a dávkování
Specifická hmotnost (hustota)	[kg.m <sup>-3</sup> ]	1000 až 1500	důležité z hlediska míchání směsi a dávkování jednotlivých složek

Tab. 4: Zpracování zalévací hmoty ve výrobním procesu [2]



Parametr	Jednotka	Rozsah typických hodnot	Poznámka
Dynamická viskozita	[mPa.s]	100 až 300 000	
Barva	[-]	různé barvy, včetně transparentní	čím vyšší viskozita, tím nižší zatékavost - důležité z hlediska míchání a dávkování směsi do zalévané sestavy
Specifická hmotnost (hustota)	[kg.m <sup>-3</sup> ]	1000 až 1500	rovnoměrné vybarvení se často používá ke kontrole kvalitního promíchání
Doba použitelnosti	[h]	0,1 až 25	důležité z hlediska míchání a dávkování
Doba vytvrzení a podmínky vytvrzení	[h]		dobu vytvrzení lze často výrazně urychlit vyšší teplotou, vlhkostí, použitím urychlovačů apod.

Tab. 5: Vlastnosti zalévací hmoty po smísení nebo aplikaci [2]

Parametr	Jednotka	Rozsah typických hodnot	Poznámka
tvrdost	[Shore A, D]	10 až 90	Shore A se užívá u měkčích materiálů (např. silikony), Shore D pro tvrdší materiály (polyuretany), u gelů se měří penetrace
součinitel teplotní roztažnosti (CTE), lineární či objemový	[K <sup>-1</sup> ]	10 <sup>-4</sup> až 10 <sup>-6</sup>	rozdílné CTE u komponent sestavy může za určitých podmínek vést k jejímu poškození
tepelná vodivost	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	0,1 až 1,2	čím vyšší, tím lépe vede teplo
mez pevnosti v tahu	[N.m <sup>-2</sup> ]	0,2 až 65	vliv na mechanickou pevnost sestavy
mez pevnosti v trhu	[N.m <sup>-2</sup> ]	2,7 až 25	vliv na mechanickou pevnost sestavy
specifická hmotnost (hustota)	[kg.m <sup>-3</sup> ]	1000 až 2000	ovlivňuje hmotnost sestavy

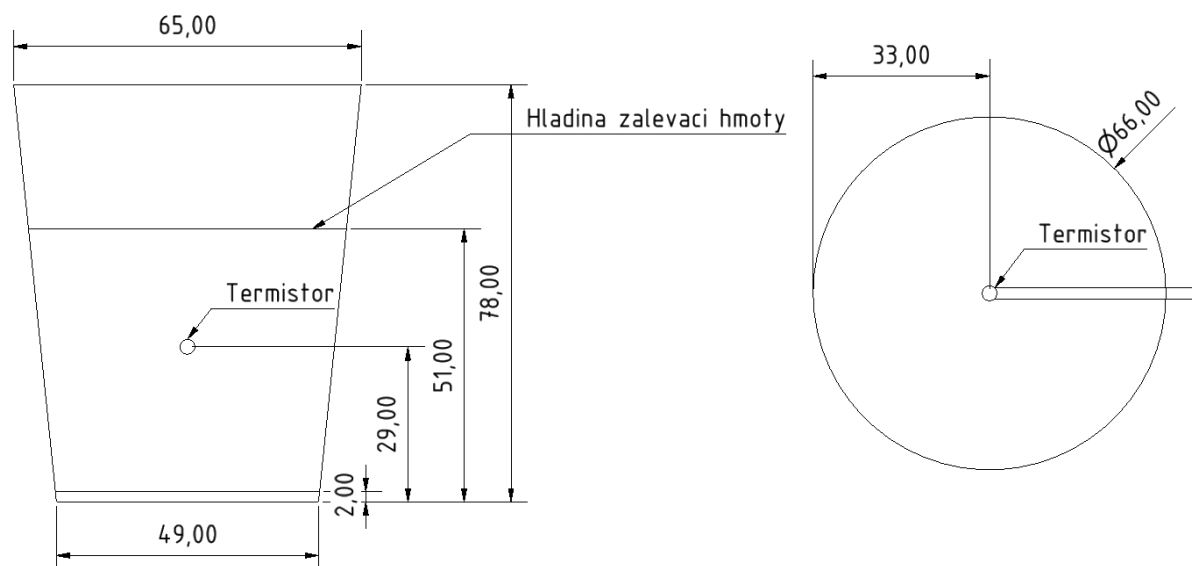
Tab. 6: Fyzikální vlastnosti zalévací hmoty po vytvrzení [2]

Další požadavky, které můžeme uvažovat při výběru zalévací hmoty: barva vytvrzené hmoty, nestékající nebo zatékavá, uvolňování těkavých složek z vytvrzené zalévací hmoty (důležité zejména v letecké technice), samozhášivost, minimální a maximální tloušťka zalévací hmoty, optické vlastnosti, přilnavost k různým typům materiálu, minimální a maximální provozní teplota, odolnost proti tepelným šokům, odolnost proti olejům, palivům, organickým rozpouštědlům apod.

## 5 MĚŘENÍ OTEPLOVACÍCH CHARAKTERISTIK

Hlavním důvodem zalití výkonové elektroniky zalévací hmotou, je ochrana součástek a spojů před poškozením vlivem vibrací, vlhkosti, usazením vodivého prachu a podobně. Zalitím dojde ke změně teplotních poměrů na desce – pracovní teplota součástek bude vyšší nebo nižší než před zalitím. Proto je nutné vybrat vhodnou zalévací hmotu, která bude teplo dobře od zalité elektroniky odvádět. Pro splnění těchto požadavků vybíráme hmoty s co nejvyšší tepelnou vodivostí a tepelnou kapacitou. Pokud nahlédneme do katalogových listů výrobců zalévacích hmot, většinou není problém dohledat hodnotu tepelné vodivosti. Je uváděna v jednotkách ( $W/m.K$ ). Tepelnou kapacitu zalévacích hmot většinou bohužel nezjistíme vůbec. Někteří výrobci dokonce hodnoty tepelné vodivosti ani neuvádějí nebo uvádí pouze přibližné hodnoty. Nevíme ale, v jakých laboratorních podmínkách byly tyto hodnoty naměřeny. Z toho důvodu vznikla myšlenka na vytvoření metodiky pro měření tepelné vodivosti a kapacity zalévacích hmot. U většiny vybraných hmot výrobci udávají alespoň hodnotu tepelné vodivosti. Což je dobře, protože je možno vyhodnotit, jestli jsou udávané hodnoty správné.

Aby bylo možné vybrané zalévací hmoty proměřit, bylo potřeba vytvořit vzorky zalévacích hmot o stejném objemu. K tomuto dosažení jsou použity rozměrově stejné kelímky od jogurtů. V každém kelímku je ve stejném místě umístěn termistor, který je zalitý zkoumanou hmotou. Termistor slouží k ohřevu a zároveň ke snímání teploty zalévací hmoty. Jelikož je zkoumaná hmota ohřívána a zároveň měřena, omezuje se tak chyba měření. Pro představu vzorku slouží Obr. 8. Vlevo pohled zepředu a vpravo pohled shora.



Obr. 8: Rozměry vzorku zalévací hmoty (Rozměry v mm)





*Obr. 9: Termistor připraven k zalití hmotou*

K měření oteplovacích charakteristik bylo dále potřeba navrhnout specifický hardware, jehož schéma je na Obr. 10 a konkrétně popsáno v kapitole Navržený měřicí přípravek. Tento hardware slouží k udržování konstantního výkonu na termistoru, konkrétně 500mW, dále ke snímání napětí a proudu na termistoru. Hodnoty snímaných veličin jsou měřeny vývojovým kitem Arduino, v jehož mikroprocesoru se provádějí výpočty pro tepelnou charakteristiku zalévací hmoty.

Vývojový kit Arduino je založený na mikroprocesoru ATmega328. Obsahuje 13 vstupně výstupních-pinů, 6 z nich podporuje PWM a 6 jsou analogové vstupy. Pro komunikaci mezi A/D převodníkem navrženého přípravku pro měření oteplovacích charakteristik a Arduinem je využito I<sup>2</sup>C sériové sběrnice. Interní A/D převodník nemohl být kvůli malému rozlišení (10 bitů) i přesnosti použit. K měřicímu přípravku je připojen NTC termistor K164NE100 o jmenovitém odporu 100 Ohmů při teplotě 25°C, který je zalit měřenou zalévací hmotou. [10]

## 5.1 Navržený měřicí přípravek

Schéma měřicího přípravku je na Obr. 10. Měřicí přípravek obsahuje 14-ti bitový A/D převodník LTC2990 od firmy Linear Technology, který slouží ke snímání napětí a proudu na připojeném termistoru. Napětí je snímáno pomocí napěťového děliče, který je realizován rezistorem R7 (3k3 Ω) a R8 (1k5 Ω). Proud je snímán na proudovém bočníku R9 (2 Ω). A/D převodník naměřené hodnoty odesílá s periodou 10ms po sériové sběrnici I<sup>2</sup>C do mikroprocesoru ATmega328 v jehož programu je z naměřených hodnot počítán skutečný výkon na termistoru  $P_R$ , odpor termistoru  $R_T$ , který se pomocí přepočítávacích koeficientů převádí na teplotu termistoru  $T$ . Výpočty jsou realizovány podle následujících rovnic:

Výkon na termistoru

$$P_R = U * I \quad (1)$$

Odpor termistoru

$$R_T = \frac{U}{I} \quad (2)$$

Teplota termistoru

$$T = \frac{1}{A + B \cdot \log(R_T) + C \cdot (\log(R_T))^2 + D \cdot (\log(R_T))^3} - 273,15 \quad (3)$$

Konstanty  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ , které ve svých katalogových listech uvádějí jen někteří výrobci. Je potřeba správně odečíst nebo přepočíst z katalogového listu termistoru od jiného výrobce pomocí aproximace. V tomto případě je použit termistor s odporem 100 Ω při 25°C. Pro tuto hodnotu je zjištěn poměr odporu při teplotě 25 °C a 100 °C, v technickém listu je uváděn pod označení  $B_{25/100}$ . V tomto případě  $B_{25/100} = 3200$  K. Výrobce použitého termistoru konstanty  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  neuvádí, proto byly přepočteny z katalogového listu termistoru NTCLE100E3. [9]

$B_{25/100}$	$A$	$B$ (K <sup>-1</sup> )	$C$ (K <sup>-2</sup> )	$D$ (K <sup>-3</sup> )
3136	3.354016E-03	3.243880E-04	2.658012E-06	- 2.701560E-07
3390	3.354016E-03	2.993410E-04	2.135133E-06	- 5.672000E-09

Tab. 7 Hodnoty konstant, ze kterých je proveden přepočet [9]

$$X = 3390 - 3136 = 254$$

$$Y = 3200 - 3136 = 64$$

$$A = 3,354016 \cdot 10^{-3} \text{ K}$$

$$B = 3,2438880 \cdot 10^{-4} - \frac{3,2438880 \cdot 10^{-4} - 2,993410 \cdot 10^{-4}}{254} \cdot 64 = 3,180778 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$$

$$C = 2,658012 \cdot 10^{-6} - \frac{2,658012 \cdot 10^{-6} - 2,135133 \cdot 10^{-6}}{254} \cdot 64 = 2,526263 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-2}$$

$$D = -2,701560 \cdot 10^{-7} - \frac{2,701560 \cdot 10^{-7} - 5,672000 \cdot 10^{-9}}{254} \cdot 64 = -2,006560 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-3}$$

K udržení konstantního výkonu na termistoru je použit PI regulátor, na jehož vstup je s periodou 10 ms odesílána regulační odchylka  $e$  k udržení konstantního výkonu na termistoru. Regulační odchylka  $e$  je dána rozdílem naměřeného a žádaného výkonu na termistoru. PI regulátor je realizován v programu mikroprocesoru ATmega328, výstupem regulátoru je PWM signál, který prochází přes dolní propust s časovou konstantou 1ms tvořenou odporem  $R_1$  (10 k $\Omega$ ) a kondenzátorem  $C_3$  (100 nF). Pin +IN (2) je také chráněn pomocí Zenerovy diody  $D_1$  (Z5V1) proti napětí vyššímu než 5,1 V, které by mohlo poškodit měřicí vstupy A/D převodníku. Střední hodnota z PWM signálu, získaná dolní propustí  $R_1C_3$  je připojena na pin +IN (2) LT1206CR. Operační zesilovač zesiluje řídicí napětí z filtru  $R_1C_3$  a umožňuje tak udržení výkonu 500 mW na libovolné zátěži o odporu maximálně  $R_{Zmax}$ .

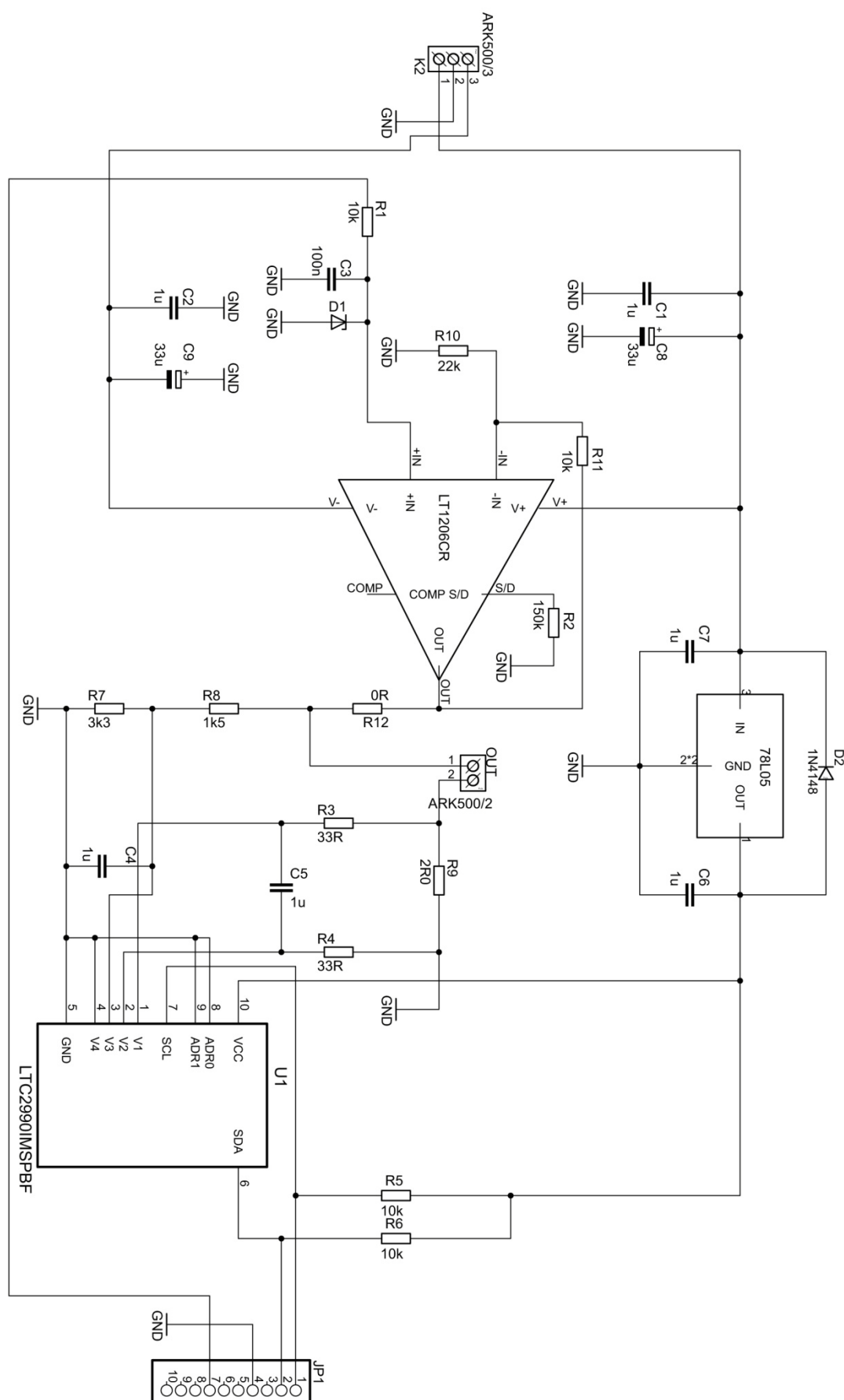
$$U_{2max} = U_{1max} \cdot A_U = U_{1max} \cdot \left(1 + \frac{R_{11}}{R_{10}}\right) = 5 \cdot \left(1 + \frac{10}{22}\right) = 7,27V$$

$$R_{zmax} = \frac{U_{2max}^2}{P_Z} - R_B = \frac{7,27^2}{0,5} - 2 = 103,7\Omega$$

Operační zesilovač je také od firmy Linear Technology maximální výstupní proud je 250 mA. Navržený měřicí přípravek je napájen napětím  $\pm 8$  V pro operační zesilovač LT1206CR, A/D převodník LTC2990 je napájen napětím +5 V, které je zajištěno pomocí lineárního stabilizátoru napětí 78L05. Referenční napětí A/D převodníku je zajištěno přesnou 10 ppm/ $^{\circ}C$  interní referencí v LTC2990. [7] [8]

Měřicí přípravek komunikuje přes USB port s počítačem. Na USB port počítače jsou odesílány s periodou 200 ms naměřená data. Tyto data jsou z USB portu vyčítány a ukládány do CSV souboru. K vyčítání dat je použita naprogramovaná čtečka, která je programována jazykem C# a uložena jako spustitelný EXE soubor. Naměřená data jsou dále zpracována v Microsoft Excelu, ve kterém je z dat vytvořen graf závislosti teploty na čase. Z tohoto grafu jsou dále odečteny hodnoty ustálené teploty a časových konstant.

Zdrojový kód pro měřicí přípravek je vytvořen v programovacím jazyku C++ a je uveden a okomentován v příloze. Taktéž deska plošného spoje Obr. 14 a osazovací výkres Obr. 15 jsou uvedeny v příloze.



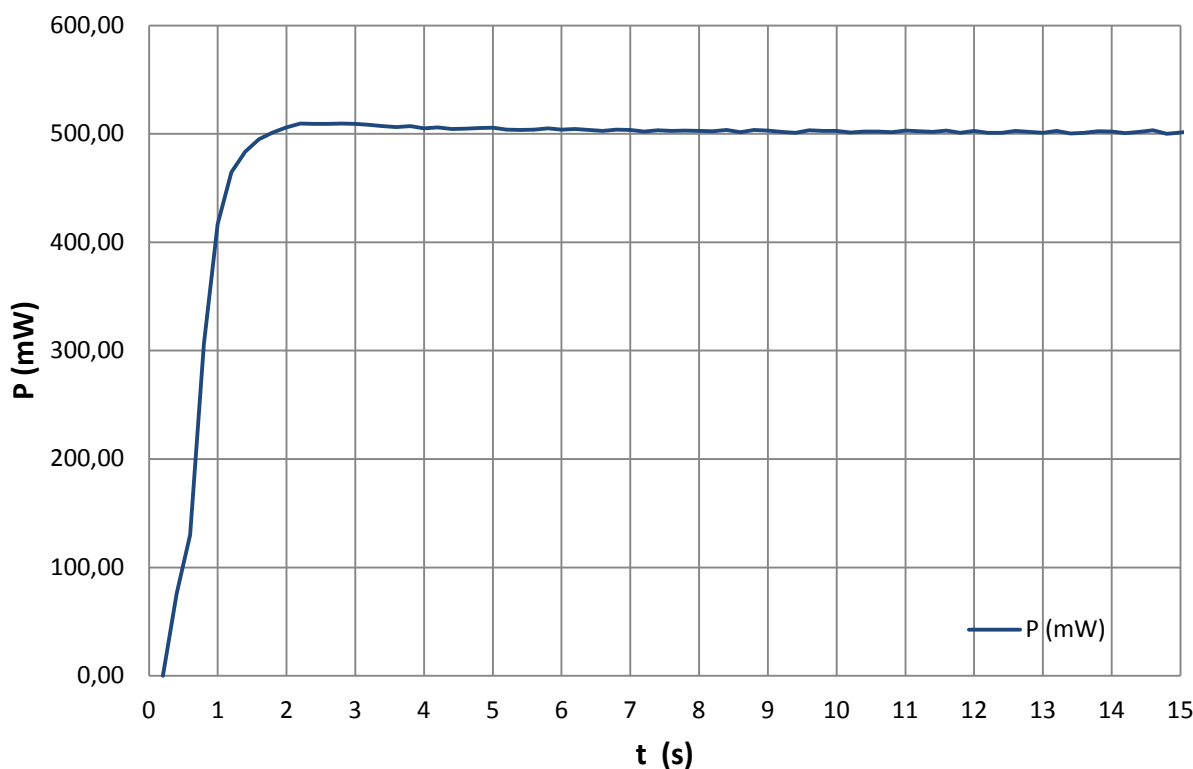
Obr. 10 Schéma zapojení měřicího přípravku

### 5.1.1 Nastavení PI regulátoru

Na použitý PI regulátor jsou kladeny tyto požadavky:

- Rychlý náběh na žádanou hodnotu výkonu 500 mW
- Co nejmenší překmit
- Stabilita regulace

Pro splnění těchto podmínek, je potřeba správně nastavit proporciální  $P$  a integrační  $I$  složku regulátoru. Proporciální  $P$  složka je prostý zesilovač, jehož regulační odchylka je přímo úměrná akční veličině. Integrační  $I$  složka je přímo úměrná integrálu regulační odchylky. Velikost  $P$  a  $I$  složky byla určena zkusmo podle odezvy na skok žádaného výkonu, byly zkoušeny různé hodnoty proporciální  $P$  a integrační  $I$  složky, výše uvedeným podmínkám vyhovují tyto velikosti jednotlivých složek:  $P = 0,001$   $I = 2$ . Přechodová charakteristika  $PI$  regulátoru je zobrazena na Obr. 11. Překmit činí 1,89% žádané hodnoty výkonu.



Obr. 11: Přechodová charakteristika  $PI$  regulátoru

$$\kappa = \left(1 - \frac{P}{P_{\max}}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{500}{509,63}\right) \cdot 100 = 1,89 \%$$

### 5.1.2 Měřené zalévací hmoty

V tabulkách níže je uveden přehled parametrů měřených hmot, které jsou rozhodujícími při zalévání elektrotechniky. Kompletní technické listy jsou uvedeny v příloze.

VEVO Vevopur 390		
Viskozita	800-900	mPa.s
Barva	černá	
Čas ztuhnutí při pok. teplotě	12-24	h
Finální vytvrzení při pok. teplotě	10-14	dní
Doba zpracovatelnosti	35-50	minut
Tvrдость	38-42	Shore D
Tepelná vodivost	0,4	W/m.K
Teplotní třída	B	
Dielektrická pevnost	32	kV/mm

Tab. 8: Polyuretan 390 od výrobce VEVO

VEVO Vevopur 403 FL		
Viskozita	2000-2500	mPa.s
Barva	černá	
Čas ztuhnutí při pok. teplotě	12-24	h
Finální vytvrzení při pok. teplotě	10-14	dní
Doba zpracovatelnosti	35-45	minut
Tvrдость	45-50	Shore D
Tepelná vodivost	0,75	W/m.K
Teplotní třída	F	
Dielektrická pevnost	30	kV/mm

Tab. 9 Polyuretan 403 FL od výrobce VEVO

Vevopur 512 FL		
Viskozita	600 - 900	mPa.s
Barva	černá	
Čas ztuhnutí při pok. teplotě	12-24	h
Finální vytvrzení při pok. teplotě	10-14	dní
Doba zpracovatelnosti	45 - 60	minut
Tvrдость	30 - 40	Shore D
Tepelná vodivost	0,8	W/m.K
Teplotní třída	B	
Dielektrická pevnost	20	kV/mm

Tab. 10 Polyuretan 512FL od výrobce VEVO

VEVO Vevopur 552 FL		
Viskozita	1000 - 1300	mPa.s
Barva	černá	
Čas ztuhnutí při pok. teplotě	12-24	h
Finální vytvrzení při pok. teplotě	10-14	dní
Doba zpracovatelnosti	35 - 50	minut
Tvrdost	65 - 70	Shore D
Tepelná vodivost	0,61	W/m.K
Teplotní třída	B	
Dielektrická pevnost	29	kV/mm

*Tab. 11 Polyuretan 552 FL od výrobce VEVO*

VEVO Vevopur 7210 FL		
Viskozita	400 - 600	mPa.s
Barva	černá	
Čas ztuhnutí při pok. teplotě	12-24	h
Finální vytvrzení při pok. teplotě	10-14	dní
Doba zpracovatelnosti	20 - 35	minut
Tvrdost	85 - 90	Shore D
Tepelná vodivost	0,61	W/m.K
Teplotní třída	B	
Dielektrická pevnost	34	kV/mm

*Tab. 12 Polyuretan 7210 FL od výrobce VEVO*

PETERS VU 4445		
Viskozita	5400 - 6600	mPa.s
Barva	černá	
Čas ztuhnutí při pok. teplotě	12-24	h
Finální vytvrzení při pok. teplotě	14	dní
Doba zpracovatelnosti	30 - 40	minut
Tvrdost	63 - 73	Shore D
Tepelná vodivost	0,7	W/m.K
Teplotní třída	F	
Dielektrická pevnost	23	kV/mm

*Tab. 13 Polyuretan VU 4445 od výrobce PETERS*

PETERS VT 3602 KK		
Viskozita	1800 - 2200	mPa.s
Barva	čirá	
Čas ztuhnutí při pok. teplotě	24	h
Finální vytvrzení při pok. teplotě	14	dní
Doba zpracovatelnosti	2	h
Tvrdost	35 - 40	Shore A
Tepelná vodivost	-	W/m.K
Teplotní třída	-	
Dielektrická pevnost	40	kV/mm

*Tab. 14 Silikon VT 3602 KK od výrobce PETERS*

PETERS VU 4694 E		
Viskozita	3500 - 5500	mPa.s
Barva	bílá	
Čas ztuhnutí při pok. teplotě	24	h
Finální vytvrzení při pok. teplotě	24	h
Doba zpracovatelnosti	2	h
Tvrdost	37 - 47	Shore A
Tepelná vodivost	0,8	W/m.K
Teplotní třída	200	°C
Dielektrická pevnost	44	kV/mm

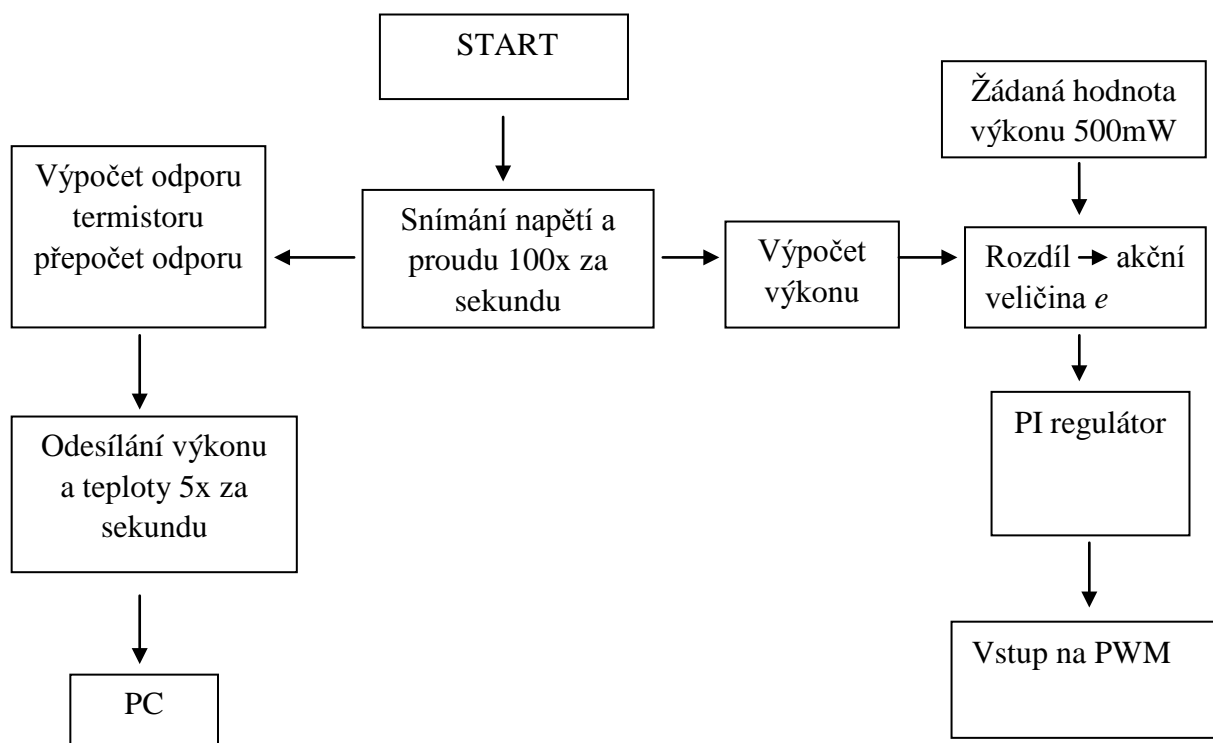
*Tab. 15 Organo-poly-syloxan od výrobce PETERS*



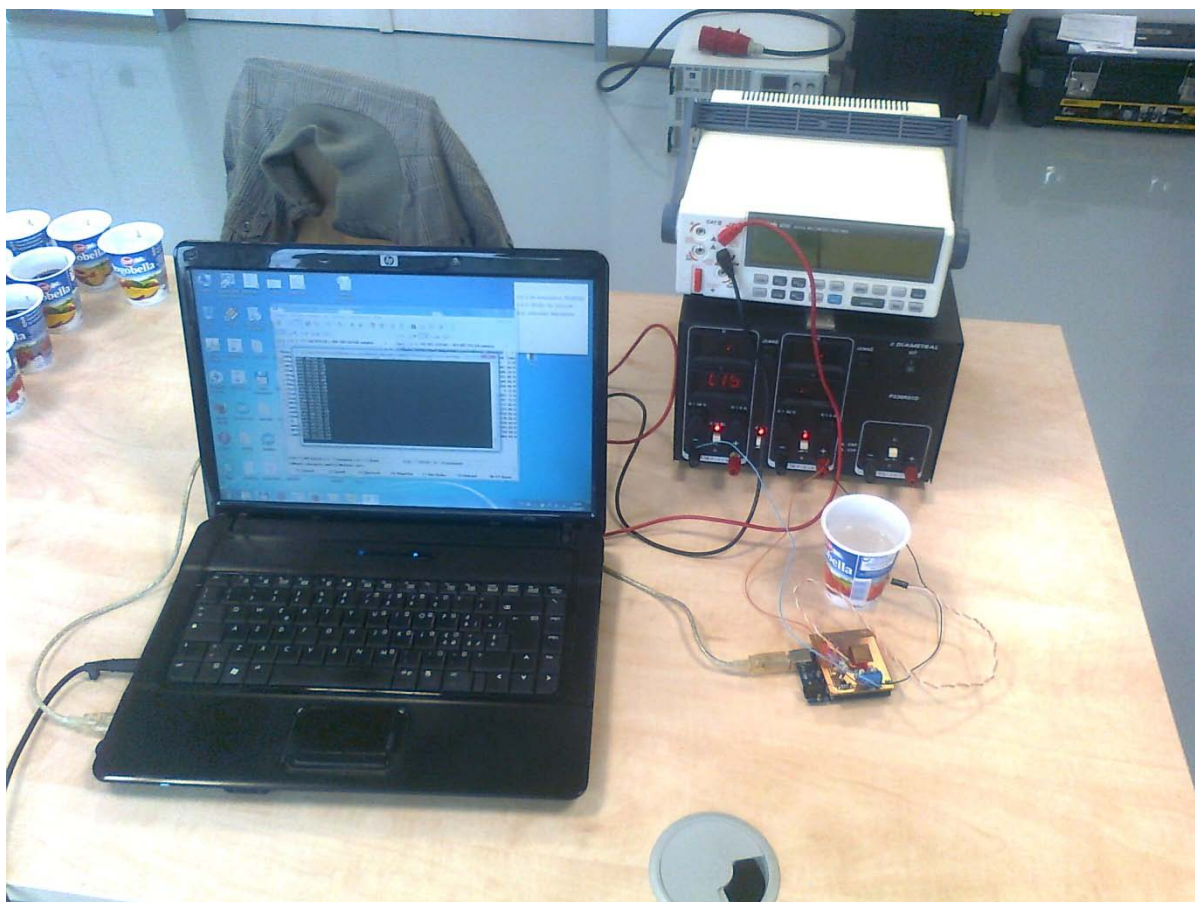
### 5.1.3 Průběh měření

Měření bylo provedeno v klimatizované místnosti se zataženými roletami při teplotě 23 °C. Od každé zalévací hmoty byly vytvořeny dva vzorky. Při kontrolním měření bylo zjištěno ze zaznamenaných hodnot, že k ustálení teploty v zalévací hmotě dojde nejdříve po 60 minutách měření, proto budeme každý vzorek měřit 90 minut. Při měření postupujeme následovně:

1. Připojíme vzorek k měřicímu přípravku
  2. Spustíme CteniDat.EXE
  3. Podle následujících kroků nastavíme čtečku pro záznam měřených hodnot z USB portu
    - Název souboru  
Zadáme název měřené zalévací hmoty a potvrdíme klávesou ENTER. Naměřená data jsou dále ukládána do námi nazvaného souboru. Soubor je umístěn ve stejné složce, ve které se nachází spustitelný EXE soubor.
    - Výběr COM portu, na kterém je připojeno Arduino  
Zadáme číslo COM portu, ve formě COMx, kde x udává číslo portu, potvrdíme klávesou ENTER. Pokud není známo, na kterém portu se Arduino nachází, lze to zjistit ve správci zařízení pod položkou COM porty.
    - Přenosová rychlost  
Pro přenos dat je použita přenosová rychlost 115200 Bd. Zadáme tuto hodnotu a potvrdíme ENTER
- Další nastavení necháme ve standardním režimu, takže všechny zbylé potvrdíme klávesou ENTER.
- Parita: None
  - Počet datových bitů: 8
  - Stop bit: One
  - Handshake: None
4. Měření se spustí 5s po potvrzení posledního řádku nastavení
  5. Po uplynutí 90 minut měření ukončíme příkazem QUIT a potvrdíme klávesou ENTER, data jsou automaticky ukládána.
  6. Následuje ruční vyhodnocení dat v programu Microsoft Excel



Obr. 12: Pracovní cyklus měřícího přípravku



Obr. 13: Měřicí pracoviště

### 5.1.4 Výsledky měření

Z naměřených výsledků byly sestrojeny grafy závislosti teploty na čase. Grafy všech měřených hmot jsou zobrazeny v příloze. Podle ustálené teploty lze měřené hmoty seřadit podle jejich tepelné vodivosti viz. Tab. 15. Hmoty, která dosáhla nejnižší ustálené teploty je nejlépe tepelně vodivá, nejlépe odevzdává teplo do okolí.

Zalévací hmota	Ustálená teplota $T_{\max}$	$T_{95\%}$	čas $T_{95\%}$	$\tau$	$\tau$	$\lambda$
	(°C)	(°C)	(s)	(s)	(min)	(W/m.K)
PU 512	42,56	40,43	1389,4	463,13	23,16	0,80
PU 403 FL	45,08	42,83	1663,2	554,40	27,72	0,75
PU 552	45,16	42,90	2183,2	727,73	36,39	0,61
VU4445	46,42	44,10	1403,4	467,80	23,39	0,70
PU 7210 FL	49,64	47,16	1616,2	538,73	26,94	0,61
PU 390	57,04	54,19	1323,8	441,27	22,06	0,40
VU4694E	53,16	50,50	1087,4	362,47	18,12	0,80
VT3602KK	65,34	62,07	1470,4	490,13	24,51	-

$\lambda$  - Tepelná vodivost uváděná výrobcem

Tab. 16: Zalévací hmoty seřazeny podle tepelné vodivosti

Podle časové konstanty  $\tau$ , lze hmoty rozdělit podle jejich tepelné kapacity viz. Tab. 16. Hmoty s nejdelším časem ustálení má největší tepelnou kapacitu.

$$T_{95\%} = T_{\max} \cdot (1 - e^{\frac{-3\tau}{\tau}})$$

Tento vztah platí pro statický systém prvního řádu. Vzhledem k tomu, že nejdelší časová konstanta  $\tau$  je daná tepelným odporem a kapacitou zalévací hmoty, můžeme změřenou odezvu zjednodušit právě na odezvu statického systému prvního řádu. Potom platí, že

$$\tau = \frac{\text{čas } T_{95\%}}{3}$$

Zalévací hmota	Ustálená teplota $T_{\max}$	$T_{95\%}$	čas $T_{95\%}$	$\tau$	$\tau$
	(°C)	(°C)	(s)	(s)	(min)
PU 552 FL	45,16	42,90	2183,2	727,73	36,39
PU 403 FL	45,08	42,83	1663,2	554,40	27,72
PU 7210 FL	49,64	47,16	1616,2	538,73	26,94
VT3602KK	65,34	62,07	1470,4	490,13	24,51
VU4445	46,42	44,10	1403,4	467,80	23,39
PU 512 FL	42,56	40,43	1389,4	463,13	23,16
PU 390	57,04	54,19	1323,8	441,27	22,06
VU4694E	53,16	50,50	1087,4	362,47	18,12

Tab. 17: Zalévací hmoty seřazeny podle tepelné kapacity

## 6 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se soustřeďuje na problematiku zalévacích hmot pro výkonovou elektrotechniku. První kapitola se věnuje použití zalévacích hmot v elektrotechnice. Druhá kapitola je věnována druhům zalévacích hmot, v této kapitole jsou sepsány vlastnosti jednotlivých skupin hmot a jejich použití. Třetí kapitola je věnována způsobům impregnování zalévací hmotou, tyto způsoby se liší v oblasti použití impregnovaného výrobku. Čtvrtá kapitola je věnována podrobným požadavkům na zalévací hmoty, tyto požadavky se liší podle prostředí v kterém bude zaléváný komponent použit a proto není potřeba u specifikované aplikace uvažovat všechny.

Po prostudování všech dostupných materiálů o zalévacích hmotách, si dovoluji shrnout oblasti použití jednotlivých druhů zalévacích hmot. Epoxidy se jednoznačně používají pro impregnování vinutí rotorů, statorů, transformátorů, tlumivek či cívek. Polyuretany mají velmi široký rozsah svého použití, mohou nabídnout široký rozsah teplotních tříd, třídy tvrdosti a také tepelné vodivosti. Jsou proto nejvíce vhodné pro zalévání výkonové elektroniky, je ale potřeba vybrat správný druh polyuretanu, pro danou aplikaci. Silikony nemají tak velký rozsah vlastností jako polyuretany a jejich použití je specifické pro danou aplikaci. Jejich výhodou je, že po vytvrzení jsou elastické, nevytváří tak vnitřní pnutí na zalité komponenty. Číré silikony mohou být využity pro zalití různě barevných LED diod, optických snímačů apod. Různě barevné LED diody umístěné v šabloně písmene nebo nápisu se zalijí čirým silikonem a následně slouží jako svítící moduly pro reklamy.

Byla vytvořena metodika pro ověření tepelné vodivosti a kapacity zalévacích hmot. Tato metodika spočívá v zalití NTC termistoru zalévací hmotou, po jejím vytvrzení přijde na řadu měření oteplovací charakteristiky za pomoci zalitého termistoru. Měření spočívá v udržování konstantního výkonu 500 mW na termistoru a zároveň snímání teploty uvnitř zalévací hmoty. K měření bylo nutné navrhnout specifický hardware a vytvořit program pro měření. Metodika měření je podrobně popsána v kapitole 5 Měření oteplovacích charakteristik.

Pro měření oteplovacích charakteristik, bylo získáno pět polyuretanů od výrobce VEVO, jeden polyuretan od výrobce PETERS a dva silikony také od výrobce PETERS. Z těchto zalévacích hmot byly vytvořeny objemově a rozměrově stejné vzorky pro měření.

Tepelná závislost všech měřených hmot je pro srovnání vynesena v Graf 1: Teplotní závislost všech měřených vzorků zalévacích hmot. Z grafu je patrné že největší tepelnou vodivost má polyuretan PU512. Nejhůře na tom je silikon VT3602KK, u tohoto silikonu výrobce neudává tepelnou vodivost, ale porovnáním naměřených hodnot ostatních hmot, lze usoudit, že se tepelná vodivost pohybuje kolem 0,15 W/m.K. Tato hmota je pro zalití komponentu od kterého je nutno odvádět teplo nevhodná. Výrobce uvádí informaci o tepelné vodivosti polyuretanu PU512 FL, která činí 0,8 W/m.K. Stejně tak je uvedena tepelná vodivost 0,8 W/m.K u silikonu VU 4694 E. Podle měření a porovnání s ostatními hmotami je tepelná vodivost silikonu VU 4694 E kolem 0,5 W/m.K. Dále je výrobcem uvedena tepelná vodivost 0,61 W/m.K polyuretanu PU 552 FL, ale podle měření a porovnání s ostatními hmotami má tepelnou vodivost vyšší a to 0,75 W/m.K.

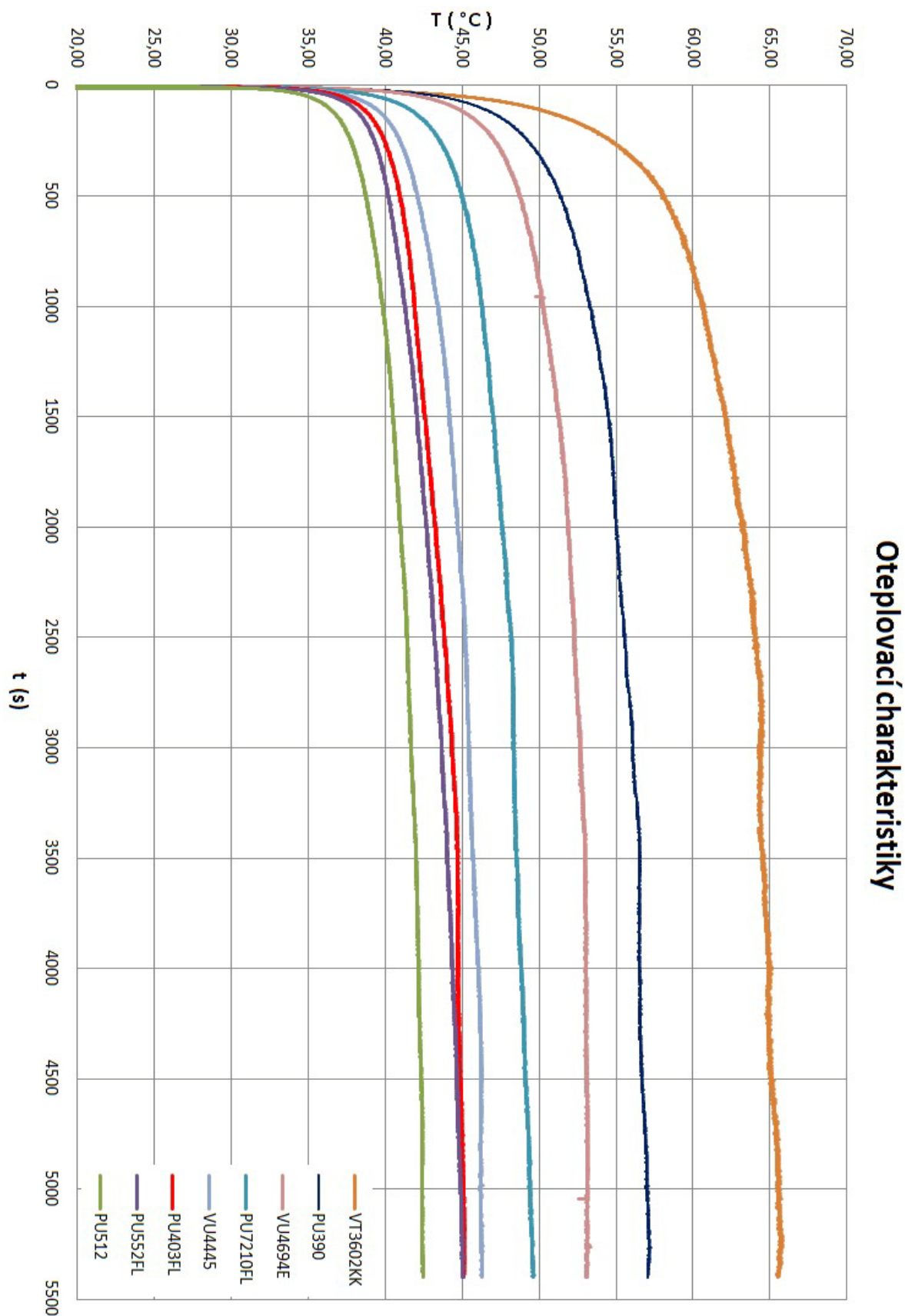
Nejvhodnější hmoty pro zalití výkonové elektroniky, u které je nutnost odvodu tepla jsou podle měření polyuretanové hmoty, konkrétně PU512FL, PU552FL a PU403FL.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Acc silicones europe: Silikonové zalévací a pouzdrící hmoty. [online]. [cit. 2013-11-05]. Dostupné z: <http://www.acc-silicones.cz/>
- [2] KOZELKA, Pavel. Zalévací hmoty pro elektroniku. *Elektro* [online]. roč. 2010, č. 04, s. 44 [cit. 2013-11-05]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/vyhledavani-vysledek/zalevací-hmoty-pro-elektroniku-40876.html>
- [3] SILENT-CZECH. [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.silent-czech.cz/produkty/izolacni-materialy/laky-a-pryskyrice/>
- [4] ABB [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.abb.cz>
- [5] ERMEG [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.ermeg.cz/>
- [6] HMF [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.navijarna-hmf.cz/cz.php?txt=vakuova-impregnace>
- [7] Linear Technology. [online]. [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/2990fc.pdf>
- [8] Linear Technology. [online]. [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1206fb.pdf>
- [9] VISHAY. [online]. [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/29049/ntcle100.pdf>
- [10] EPCOS: K164NE100. [online]. [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/hr/Document/d2c0cd4228976666a9b6dbc1f345e707/B57164K.pdf>

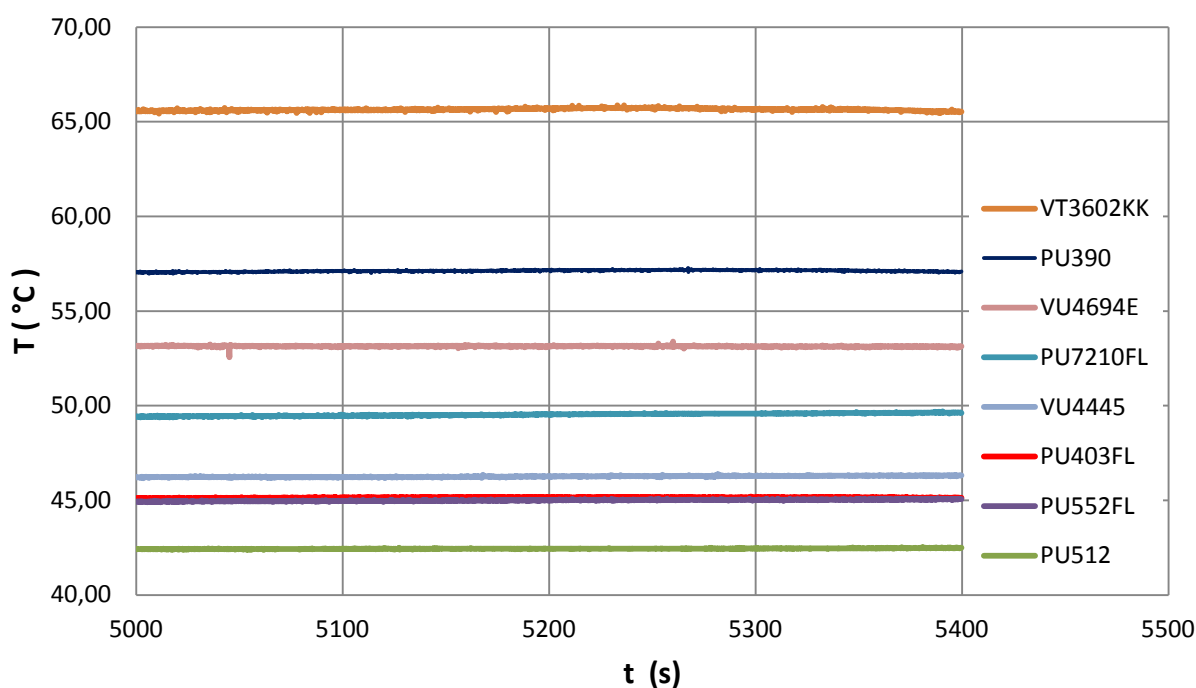


## PŘÍLOHY



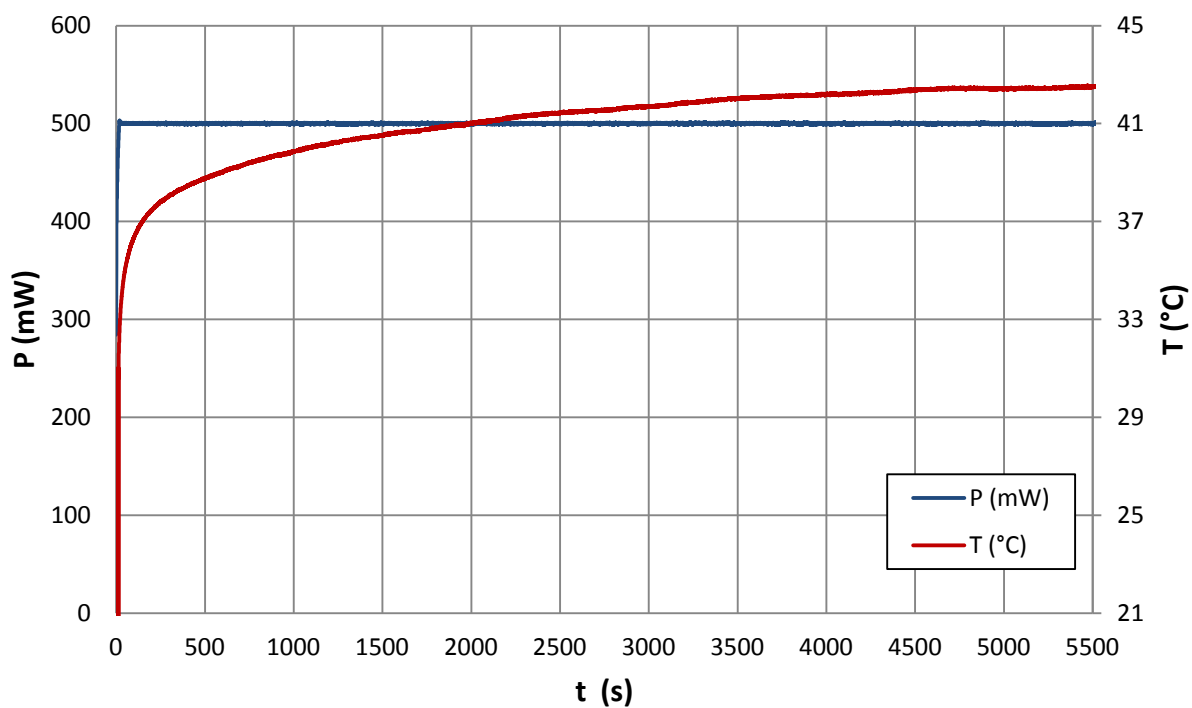
Graf 1: Teplotní závislost všech měřených vzorků zalévacích hmot

## Detail ustálené teploty

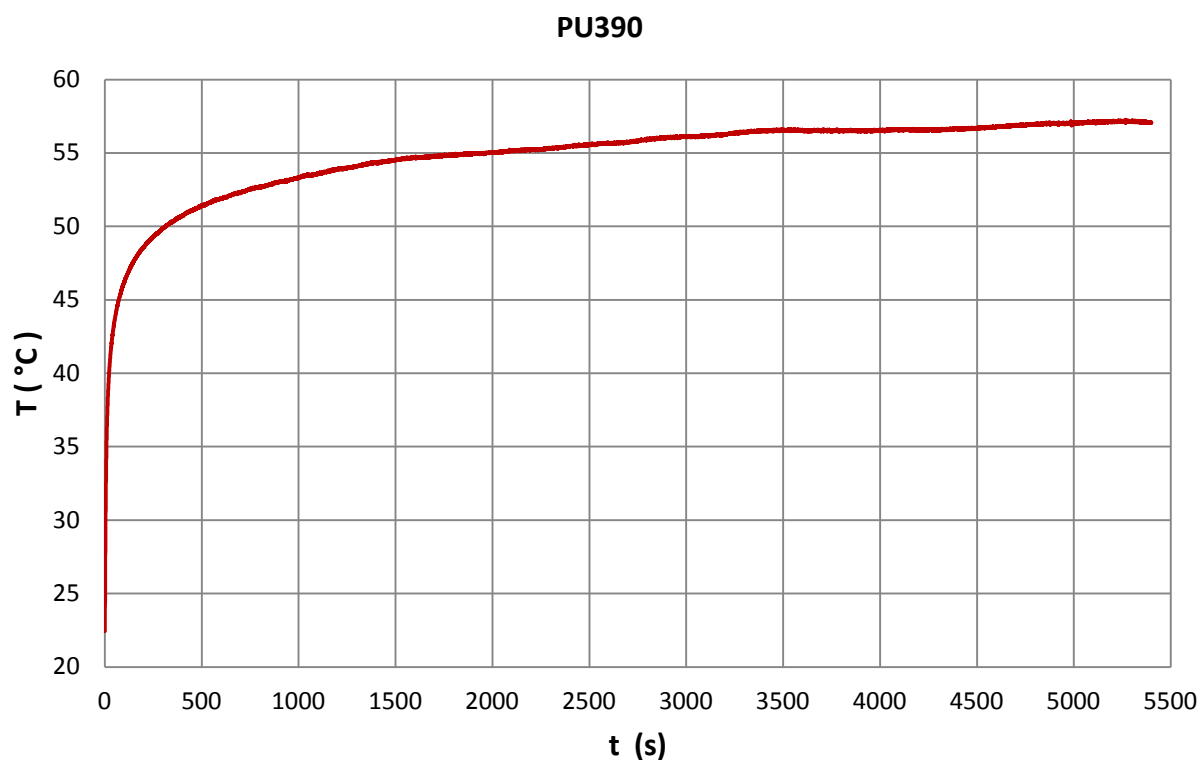


Graf 2: Detail oteplovací charakteristiky v oblasti ustálené teploty

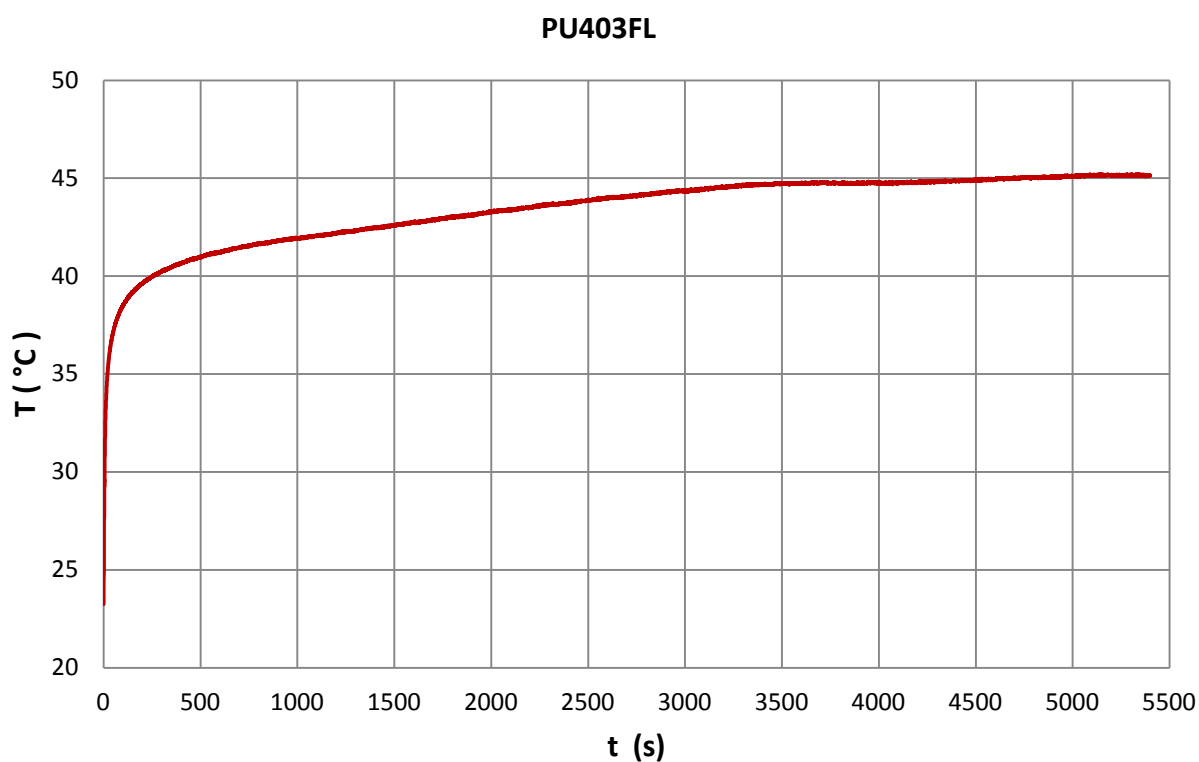
## PU512



Graf 3: Teplotní závislost PU512 při konstantním výkonu 500 mW

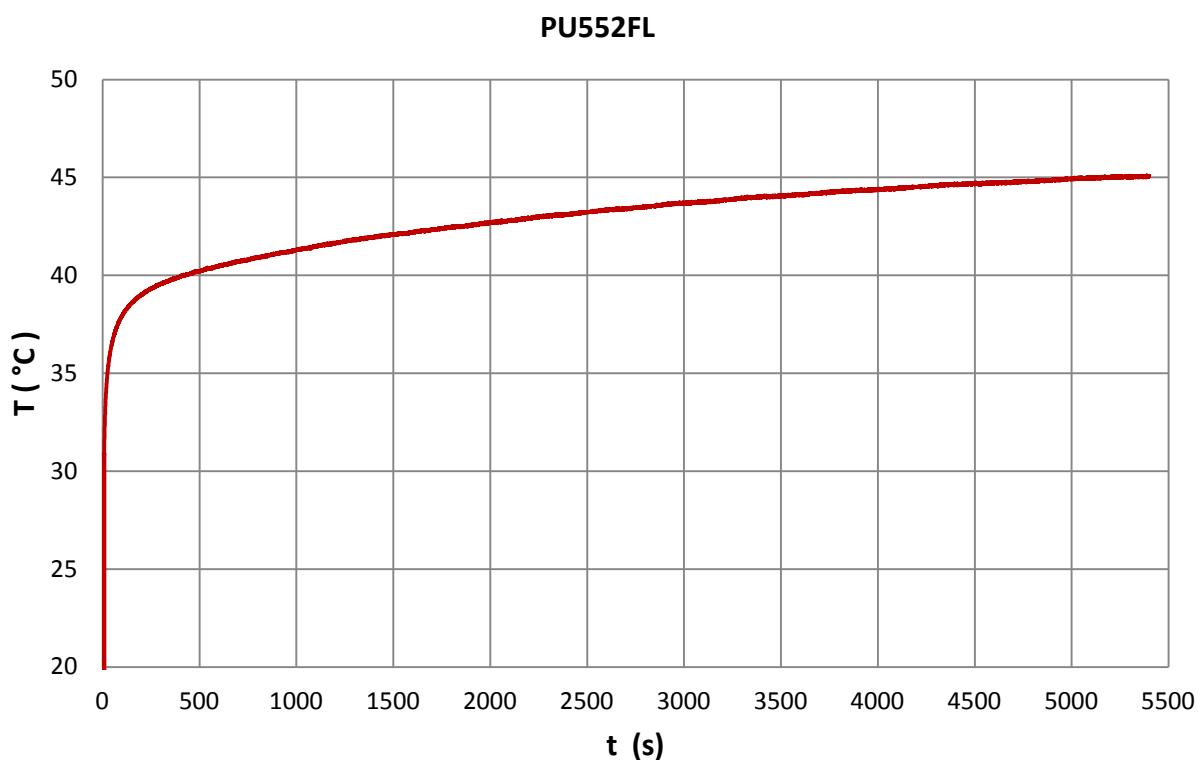


*Graf 4: Teplotní závislost PU390 při konstantním výkonu 500mW*

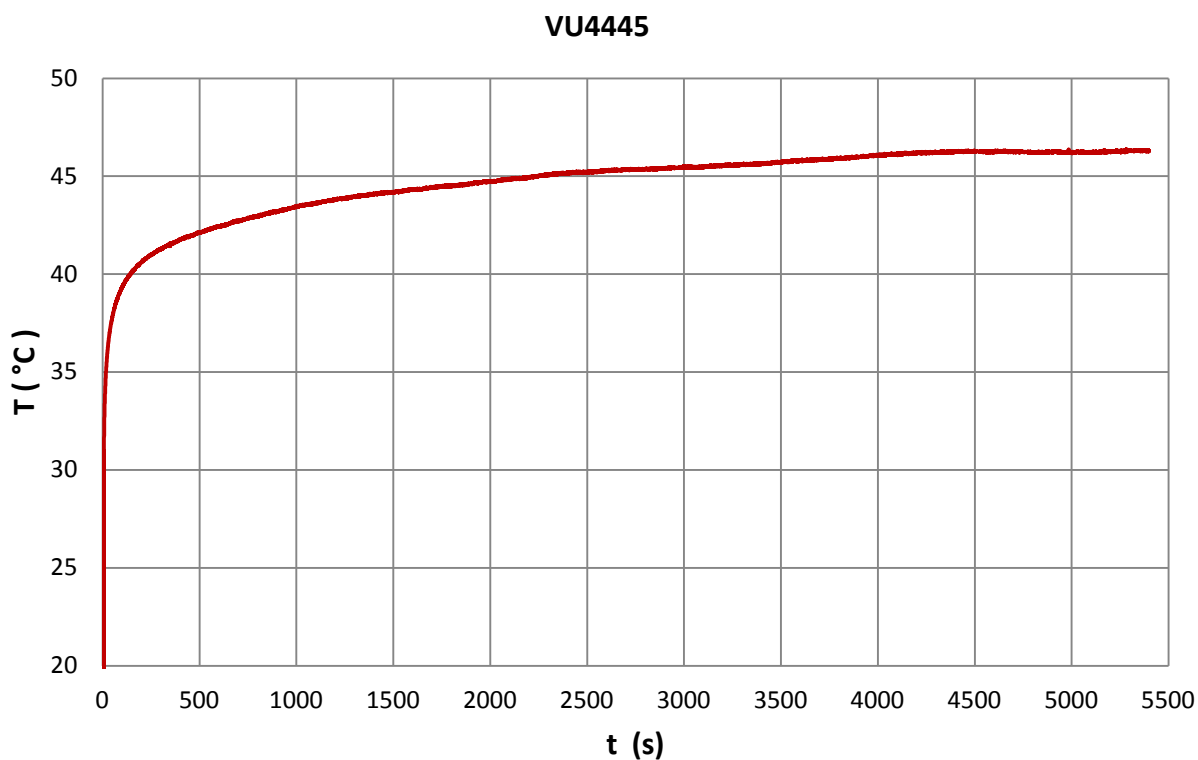


*Graf 5: Teplotní závislost PU430FL při konstantním výkonu 500 mW*

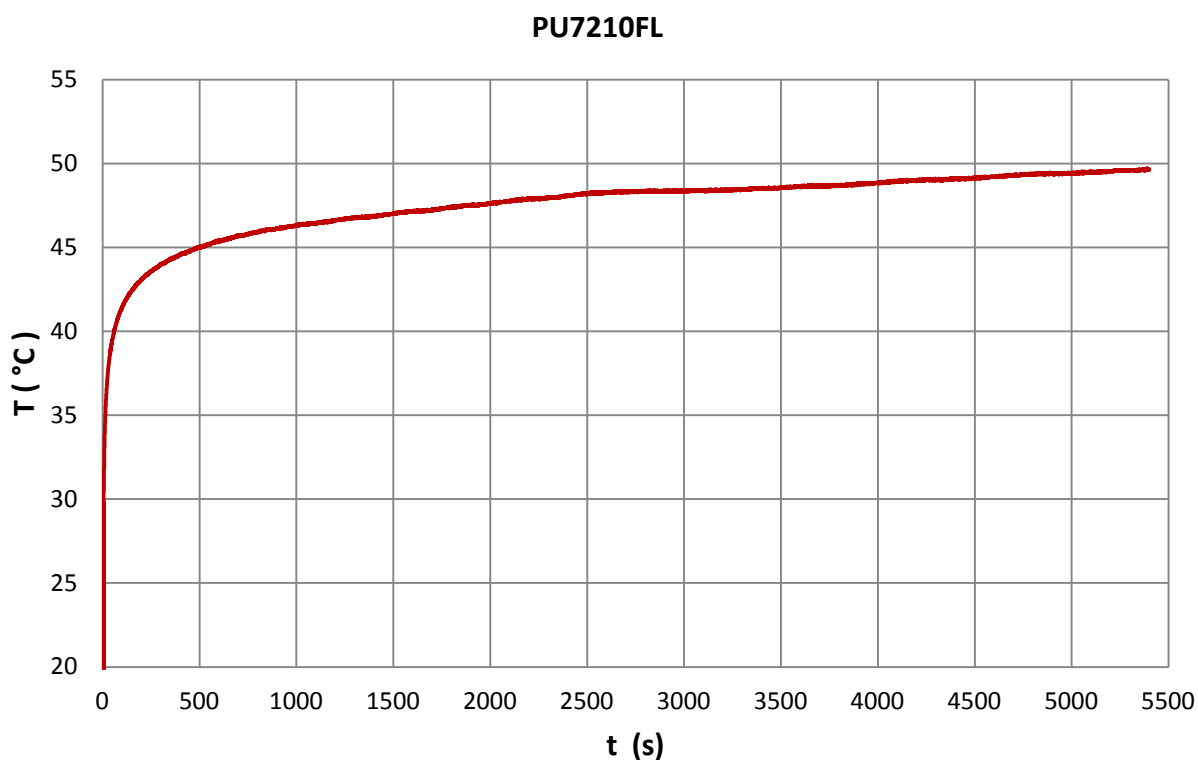




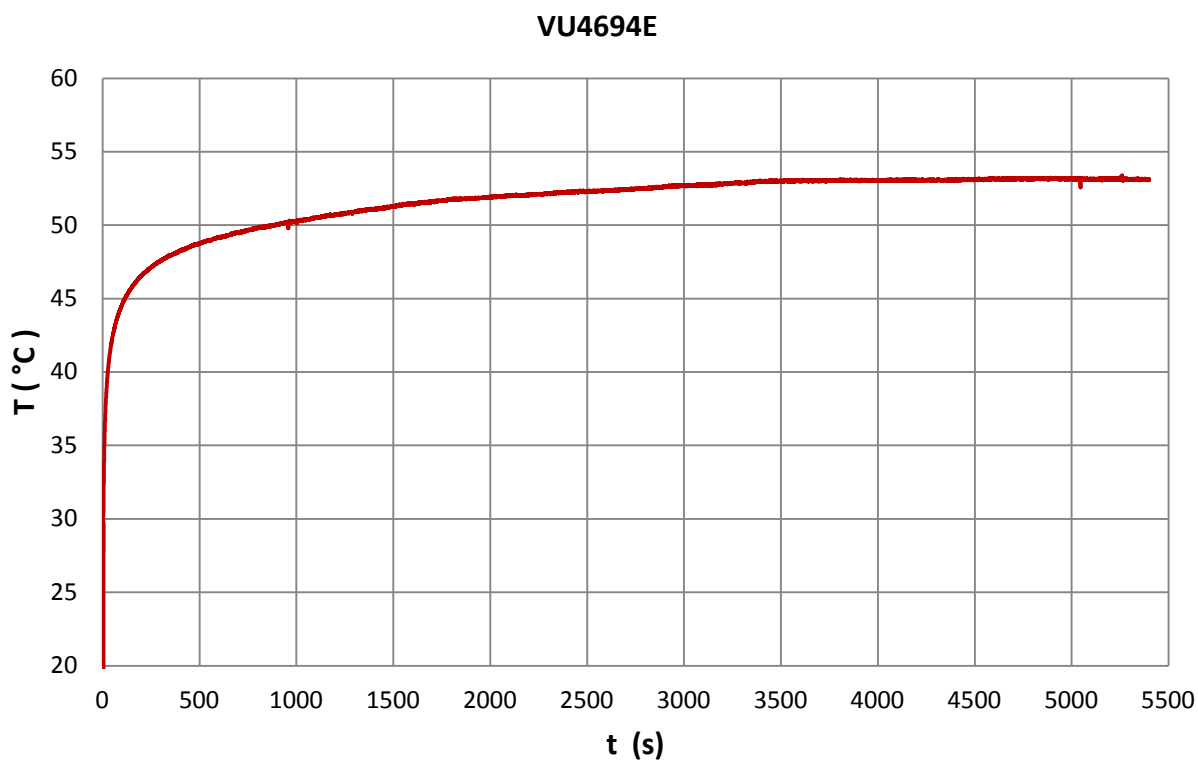
*Graf 6: Teplotní závislost PU552FL při konstantním výkonu 500 mW*



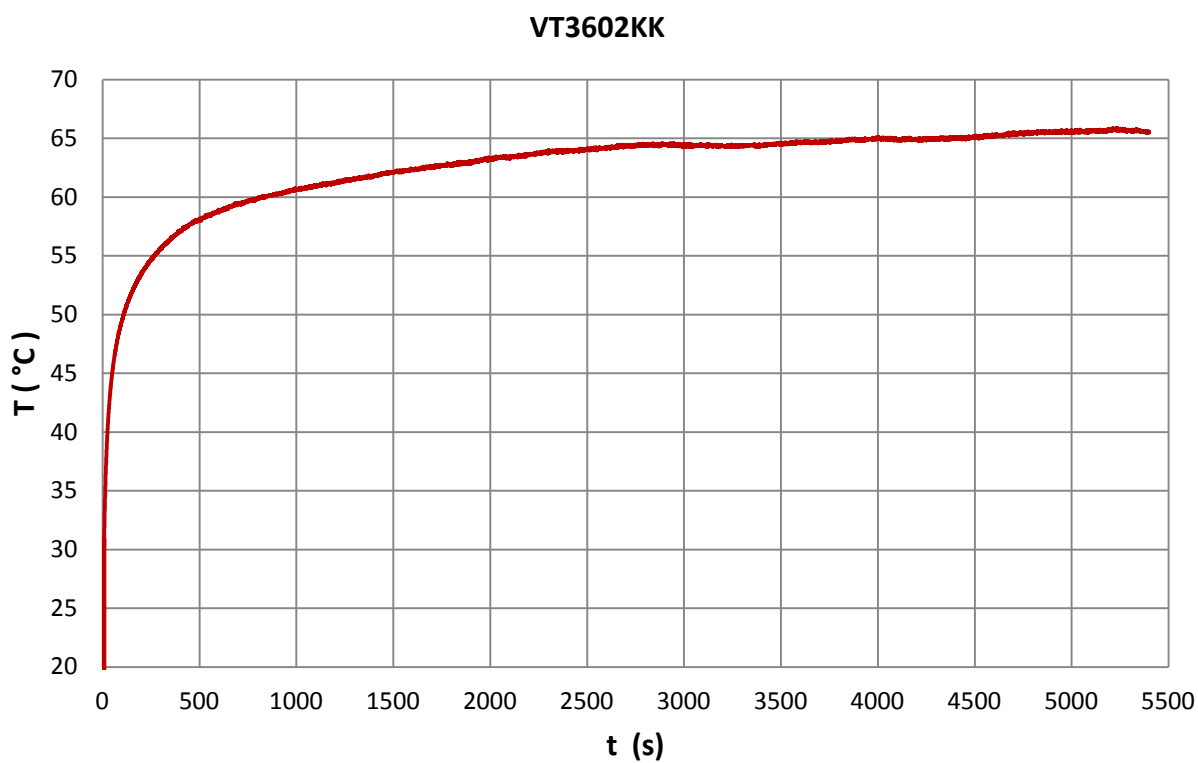
*Graf 7: Teplotní závislost VU4445 při konstantním výkonu 500 mW*



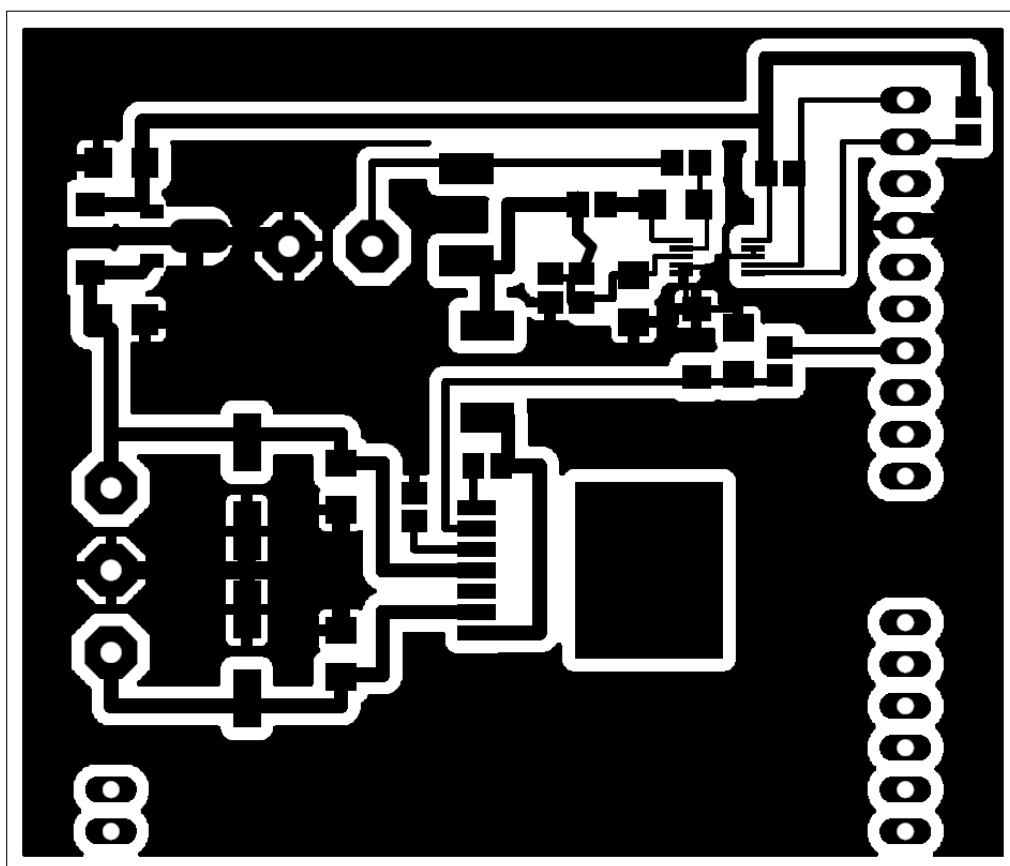
*Graf 8: Teplotní závislost PU7210FL při konstantním výkonu 500 mW*



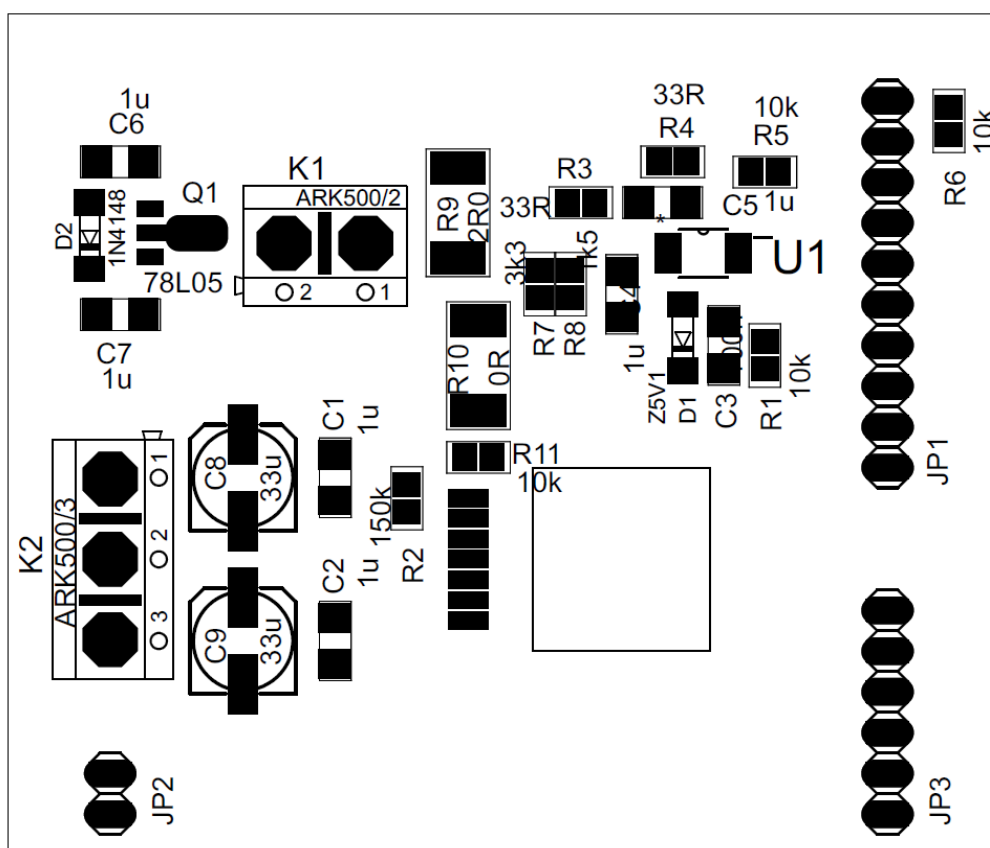
*Graf 9: Teplotní závislost VU4694E při konstantním výkonu 500 mW*



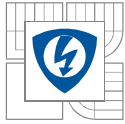
*Graf 10: Teplotní závislost VT3602KK při konstantním výkonu 500 mW*



Obr. 14 Deska plošného spoje měřicího přípravku (rozměr 64x53mm)



Obr. 15 Osazovací výkres desky plošného spoje měřicího přípravku



### Zdrojový kód měřicího přípravku v jazyce C++:

```
#include <PID_v1.h> // knihovna univerzálního PID regulátoru
#include <Arduino.h>
#include <stdint.h>
#include <Linduino.h> // knihovna od Linear Technology
#include <UserInterface.h>
#include <LT_I2C.h>
#include <LTC2990.h> // pro komunikaci s A/D převodníkem
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <Timer.h>

#define PWMPIN 11 // pin 11 je využit pro výstup PWM
#define COEF_I (1.90735E-05) // konstanta převodu AD převodníku
#define PID_KP 0.001 // konstanta proporcionálního členu 0.001
#define PID_KI 2.0 // konstanta integračního členu 2.0
#define PID_KD 0.0 // D člen není využit

// Deklarace funkcí

void setPwmFrequency(int pin, int divisor); // Funkce pro nastavení rychlosti PWM
void mereni(); // Funkce měření
void vypis(); // Funkce výpisu

// Globální proměnné
static uint8_t demo_board_connected; // Nastav jedna když je deska připojena
const uint16_t LTC2990_TIMEOUT=1000; // Maximální časový limit pro čtení LTC2990
float voltage_1, proud, vykon, voltagesk, Rt, T;
Timer t;
float Tsum=0, Psum=0;
int i=0;

double pid_w, pid_a;
PID regPID((double*) &vykon, &pid_a, &pid_w, PID_KP, PID_KI, PID_KD, DIRECT);

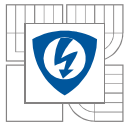
// Kalibrační konstanta
const float LTC2990_SINGLE_ENDED_lsb = 3.05176E-04;

void setup()
{
    int8_t ack=0;
    quikeval_I2C_init(); // Inicializace Linduino I2C portu

    Serial.begin(115200); // inicializace seriového portu PC

    ack |= LTC2990_register_write(LTC2990_I2C_ADDRESS, LTC2990_CONTROL_REG,
LTC2990_ENABLE_ALL); // Enables all channels
    ack |= LTC2990_register_write(LTC2990_I2C_ADDRESS, LTC2990_TRIGGER_REG, 0x01);
    // Povolení Single-Ended režimu
    ack |= LTC2990_register_set_clear_bits(LTC2990_I2C_ADDRESS, LTC2990_CONTROL_REG,
LTC2990_V1V2_V3_V4, 0x07);
    setPwmFrequency(PWMPIN,1); // rychlost PWM
    t.every(10, mereni); // měření každých 10ms
    t.every(200, vypis); // výpis každých 200ms

    regPID.SetOutputLimits(0,255); // rozsah výstupních hodnot
    regPID.SetMode(AUTOMATIC); // automatický mód
    regPID.SetSampleTime(10); // vzorkovací čas 10ms
    pid_w = 500; // zadaná hodnota výkonu termistoru 500mW
```



```
analogWrite(PWMPIN, 0);          // zapis pwm na pin pro PWM
while (!Serial.available())      // ceka na zadani znaku
{
    delay(5000);                 // 5s prodleva pred zacatkem mereni
    Serial.print(F("\nP [mW]\";\nT [C]\n\r\n")); //Vytiskne hlavicku pro mereni
}

}

// Repeats Linduino loop
void loop()
{
    t.update();
}

void mereni ()
{
    int8_t ack=0;
    int16_t code;
    int8_t data_valid;

    // promenne ve floatu pouzivane pri vypoctu
    float logRt,voltage, voltage_2;

    //konstanty pro prepocet odporu na teplotu
    float a=3.354016e-03,b=3.190631e-04,c=2.546849e-06,d=-2.139271e-07;

    // Flush one ADC reading in case it is stale.
    ack |= LTC2990_adc_read(LTC2990_I2C_ADDRESS, LTC2990_V1_MSB_REG, &code,
&data_valid);

    voltage_1 = ((float) code) * COEF_I;
    proud = voltage_1*500;

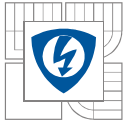
    // Flush one ADC reading in case it is stale. Then, take a new fresh reading.
    ack |= LTC2990_adc_read(LTC2990_I2C_ADDRESS, LTC2990_V3_MSB_REG, &code,
&data_valid);
    voltage = LTC2990_code_to_single_ended_voltage(code, LTC2990_SINGLE_ENDED_lsb);

    voltagesk=voltage*((3300.0+1500.0)/3300.0); // skutečne napeti na termistoru
    vykon=proud*voltagesk;                    // vypocet vykonu na termistoru
    Psum=Psum+vykon;
    Rt = voltagesk*1000/proud - 2;             // odpor termistoru
    logRt=log(Rt*0.01);                       // logaritmus odporu

    // Prevod odporu na teplotu ve °C
    T = (1.0/(a+b*logRt+c*logRt*logRt+d*logRt*logRt*logRt)) - 273.15;
    Tsum=Tsum+T;
    i++;
    regPID.Compute();
    analogWrite(PWMPIN, pid_a);               // zapis pwm na pin 11
}

void vypis() // Vypis merenych hodnot 10x za s
{
    Serial.print(Psum/i, 2);
    Serial.print(F(";"));
    Psum=0;

    Serial.print(Tsum/i, 2);
    Serial.print(F("\r\n"));
    Tsum=0;
    i=0;
}
```



```
// Nastaveni rychlosti PWM

void setPwmFrequency(int pin, int divisor)
{
    byte mode;
    if(pin == 5 || pin == 6 || pin == 9 || pin == 10)
    {
        switch(divisor)
        {
            case 1: mode = 0x01; break;
            case 8: mode = 0x02; break;
            case 64: mode = 0x03; break;
            case 256: mode = 0x04; break;
            case 1024: mode = 0x05; break;
            default: return;
        }
    }
    if(pin == 5 || pin == 6)
    {
        TCCR0B = TCCR0B & 0b11111000 | mode;
    }
    else {
        TCCR1B = TCCR1B & 0b11111000 | mode;
    }
}
else if(pin == 3 || pin == 11)
{
    switch(divisor)
    {
        case 1: mode = 0x01; break;
        case 8: mode = 0x02; break;
        case 32: mode = 0x03; break;
        case 64: mode = 0x04; break;
        case 128: mode = 0x05; break;
        case 256: mode = 0x06; break;
        case 1024: mode = 0x07; break;
        default: return;
    }
}
TCCR2B = TCCR2B & 0b11111000 | mode;
}
```

## WEVOPUR 390

---

Two-component encapsulating system based on polyurethane. The resin component is formulated with a mineral filler which provides self-extinguishing properties.

The material achieves UL 94 V-2 properties at a thickness of 1,5 mm and is approved and listed under the File No. E108835 in colours black, grey and brown.

The resin contains no halogenated flame-retardants, no heavy metals or chlorofluorocarbons.

Temperature range of use: -40°C to +130°C .

The casting resin is used with **WEVONAT 300**

Applications:      Encapsulation of electrical components for low and medium voltage applications.

### Product Specification:

<u>Mixing ratio:</u>	by weight: 100 parts WEVOPUR 390: 30 parts WEVONAT 300		
<u>Viscosity (22°C):</u>	WEVOPUR 390:	1.600 - 2.400	mPa·s
	WEVONAT 300:	70 - 120	mPa·s
	Mixture:	800 - 900	mPa·s
<u>Density (22°C):</u>	WEVOPUR 390:	1,28 - 1,31	g/cm³
	WEVONAT 300:	1,20 - 1,24	g/cm³
<u>Colour:</u>	WEVOPUR 390:	black or as requested	
	WEVONAT 300:	dark brown	
<u>Pot life (250g):</u>	35 - 50 minutes	at room temperature	
	The curing time depends on the temperature, the potlife, the thickness of the layer and the casting volume.		
<u>Curing time:</u>	12 - 24 hours	at room temperature	
<u>Final hardness:</u>	10 - 14 days	at room temperature	

*It is possible to accelerate the potlife and curing time as requested.*





## **Physical Properties:**

<u>Shore-hardness D:</u>	38 - 42	ISO 868, DIN 53505
<u>Tensile strength:</u>	7 N/mm <sup>2</sup>	ISO 527-2
<u>Elongation at break:</u>	88 %	ISO 527-2
<u>Modulus of elasticity:</u>	15 N/mm <sup>2</sup>	ISO 527-2
<u>Thermal conductivity:</u>	0,4 W/m·K	ISO 8894
<u>Glass transition temperature:</u>	-4 °C	TMA
<u>Coefficient of Expansion:</u>	79 ppm/K 178 ppm/K	< -10°C, TMA > 0°C, TMA
<u>Thermal class:</u>	B	IEC 60085
<u>Shrinkage after curing:</u>		
<u>Water absorption:</u>	0,3 %	after 30 days immersion
<u>Flammability:</u>	V-2, 1,5 mm	UL94
<u>Glow wire flammability:</u>	960°C, 5,8-6,8 mm	IEC 695-2-1

## **Electrical Properties:**

<u>Dielectric strength:</u>	32 kV/mm	IEC 60243-1 VDE 0303, TI.2
<u>Volume resistance:</u> 23°C/50% r.h.	$6,7 \cdot 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$	IEC 60093 VDE 0303, TI.30
<u>Surface resistance:</u> 23°C/50% r.h.	$1,1 \cdot 10^{16} \Omega$	IEC 60093 VDE 0303, TI.30
<u>Dielectric constant <math>\epsilon</math>:</u> at 50 Hz, 23°C bei 1 kHz, 23°C bei 1 MHz, 23°C	5,5 4,4 3,6	IEC 60250 VDE 0303, TI.4
<u>Dissipation factor <math>\tan \delta</math> :</u> at 50 Hz, 23°C bei 1 kHz, 23°C bei 1 MHz, 23°C	0,14 0,09 0,03	IEC 60250 VDE 0303, TI.4
<u>Comparative tracking index:</u>	CTI 600	IEC 60112 VDE 0303, TI.1

Packaging: 5 kg, 10 kg and 30 kg-buckets 250 kg drums

Shelf life: in original closed cans or drums, dry storage between 15°C and 25°C, 6 months.

Our technical advice - whether verbal, in writing or by way of trials - is given in good faith but without warranty, and this also applies where proprietary rights of third parties are involved. It does not release you from the obligation to test the products supplied by us to their suitability for the intended processes and uses. The application, use and processing of the products are beyond our control and therefore, entirely your own responsibility. Should in spite of this occur a case of liability from our side, this will be limited to any damage to the value of the merchandise delivered by us. We will, of course, provide products of consistent quality within the scope of our General Conditions of Sale and Delivery.

## WEVOPUR 403 FL

---

Two-component encapsulating system based on polyurethane. The polymerized system has self-extinguish properties and is tested by Underwriters Laboratories under the File-No. E108835 at a thickness of 1,5 mm according to UL94V-0. HWI, HAI and CTI-tests are passed with PLC 0, RTI value is 155°C (electrical strength). This product has the all colour recognition. The resin contains no halogenated flame-retardants, no heavy metals or chlorofluorocarbons.

After curing the resin has an excellent flexibility at low temperatures and thermal endurance as well as an outstanding behaviour in thermal shock tests.

Temperature range of use: -50°C to +165°C .

The casting resin is used with **WEVONAT 300 RE**

Applications: Encapsulation of applications that require high thermal resistance and endurance, like coils, sensors or PCBs. Especially for automotive or ex-proof applications.

### Product Specification:

<u>Mixing ratio:</u>	by weight: 100 parts WEVOPUR 403FL: 14 parts WEVONAT 300 RE	
<u>Viscosity (22°C):</u>	WEVOPUR 403FL:	12.000 - 18.000 mPa·s
	WEVONAT 300 RE:	15 - 40 mPa·s
	Mixture:	2.000 - 2.500 mPa·s
<u>Density (22°C):</u>	WEVOPUR 403FL:	1,62 - 1,65 g/cm³
	WEVONAT 300 RE:	1,20 - 1,24 g/cm³
<u>Colour:</u>	WEVOPUR 403FL:	black or as requested
	WEVONAT 300 RE:	brown
<u>Pot life (100g):</u>	35 - 45 minutes	at room temperature
	The curing time depends on the temperature, the potlife, the thickness of the layer and the casting volume.	
<u>Curing time:</u>	12 - 24 hours	at room temperature
<u>Final hardness:</u>	10 - 14 days	at room temperature

*It is possible to accelerate the potlife and curing time as requested.*



## **Physical Properties:**

<u>Shore-hardness D:</u>	45 - 50	ISO 868, DIN 53505
<u>Tensile strength:</u>	9 N/mm <sup>2</sup>	ISO 527-2
<u>Elongation at break:</u>	40 %	ISO 527-2
<u>Modulus of elasticity:</u>	110 N/mm <sup>2</sup>	ISO 527-2
<u>Thermal conductivity:</u>	0,75 W/m·K	ISO 22007-2:2008
<u>Glass transition temperature:</u>	-6 °C	TMA
<u>Coefficient of Expansion:</u>	42 ppm/K 146 ppm/K	< -10°C, TMA > 5°C, TMA
<u>Thermal class:</u>	F	IEC 60085
<u>Shrinkage after curing:</u>	1,6 %	
<u>Water absorption:</u>	0,6 %	after 30 days immersion
<u>Flammability:</u>	V-0, 1,6 mm	UL94

## **Electrical Properties:**

<u>Dielectric strength:</u>	30 kV/mm	IEC 60243-1 VDE 0303, TI.2
<u>Volume resistance:</u> 23°C/50% r.h.	$1,9 \cdot 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$	IEC 60093 VDE 0303, TI.30
<u>Surface resistance:</u> 23°C/50% r.h.	$2,8 \cdot 10^{15} \Omega$	IEC 60093 VDE 0303, TI.30
<u>Dielectric constant <math>\epsilon</math>:</u> at 50 Hz, 23°C bei 1 kHz, 23°C bei 1 MHz, 23°C	5,7 5,3 4,7	IEC 60250 VDE 0303, TI.4
<u>Dissipation factor <math>\tan \delta</math> :</u> at 50 Hz, 23°C bei 1 kHz, 23°C bei 1 MHz, 23°C	0,04 0,04 0,03	IEC 60250 VDE 0303, TI.4
<u>Comparative tracking index:</u>	CTI 600	IEC 60112 VDE 0303, TI.1

Packaging: 5 kg, 10 kg and 30 kg-buckets 250 kg drums

Shelf life: in original closed cans or drums, dry storage between 15°C and 25°C, 6 months.

Our technical advice - whether verbal, in writing or by way of trials - is given in good faith but without warranty, and this also applies where proprietary rights of third parties are involved. It does not release you from the obligation to test the products supplied by us to their suitability for the intended processes and uses. The application, use and processing of the products are beyond our control and therefore, entirely your own responsibility. Should in spite of this occur a case of liability from our side, this will be limited to any damage to the value of the merchandise delivered by us. We will, of course, provide products of consistent quality within the scope of our General Conditions of Sale and Delivery.

## WEVOPUR 512 FL

---

Two-component encapsulating system based on polyurethane. The polymerized system has self-extinguish properties. The resin contains no halogenated flame-retardants. After curing the material has an excellent flexibility and therefore applies especially in case of encapsulation of pressure sensitive ferrites and SMD components.

The material exhibits properties according to UL94 V-0 at a thickness of 4 mm. The system is tested by Underwriters Laboratories under the File-No. E108835. HWI and HAI tests are passed with PLC 0, the RTI value is 130°C (mechanical and electrical strength).

Temperature range of use: -40°C to +130°C .

The casting resin is used with **WEVONAT 900**

Applications: Encapsulation of electrical components like coils, sensors, capacitors or PCBs.

### Product Specification:

<u>Mixing ratio:</u>	by weight: 100 parts WEVOPUR 512FL: 16 parts WEVONAT 900		
<u>Viscosity (22°C):</u>	WEVOPUR 512FL:	2.800 -	4.500 mPa·s
	WEVONAT 900:	10 -	50 mPa·s
	Mixture:	600 -	900 mPa·s
<u>Density (22°C):</u>	WEVOPUR 512FL:	1,55 -	1,58 g/cm³
	WEVONAT 900:	1,20 -	1,24 g/cm³
<u>Colour:</u>	WEVOPUR 512FL:	blue or as requested	
	WEVONAT 900:	brown	
<u>Pot life (250g):</u>	45 - 60 minutes	at room temperature	
	The curing time depends on the temperature, the potlife, the thickness of the layer and the casting volume.		
<u>Curing time:</u>	12 - 24 hours	at room temperature	
<u>Final hardness:</u>	10 - 14 days	at room temperature	

*It is possible to accelerate the potlife and curing time as requested.*



## **Physical Properties:**

<u>Shore-hardness D:</u>	30 - 40	ISO 868, DIN 53505
<u>Tensile strength:</u>	7 N/mm <sup>2</sup>	ISO 527-2
<u>Elongation at break:</u>	20 %	ISO 527-2
<u>Modulus of elasticity:</u>		ISO 527-2
<u>Thermal conductivity:</u>	0,8 W/m·K	ISO 22007-2:2008
<u>Glass transition temperature:</u>	-4 °C	TMA
<u>Coefficient of Expansion:</u>	55 ppm/K 160 ppm/K	< -20°C, TMA > -5°C, TMA
<u>Thermal class:</u>	B	IEC 60085
<u>Shrinkage after curing:</u>	1 %	
<u>Water absorption:</u>	0,3 %	after 30 days immersion
<u>Flammability:</u>	V-0, 4 mm	UL94
<u>Glow wire flammability:</u>	4mm, 960°C / 825°	IEC 60695-2-12/-13 GWFI/GWIT

## **Electrical Properties:**

<u>Dielectric strength:</u>	20 kV/mm	IEC 60243-1 VDE 0303, TI.2
<u>Volume resistance:</u> 23°C/50% r.h.	10 <sup>13</sup> Ω·cm	IEC 60093 VDE 0303, TI.30
<u>Surface resistance:</u> 23°C/50% r.h.	10 <sup>14</sup> Ω	IEC 60093 VDE 0303, TI.30
<u>Dielectric constant ε:</u> at 50 Hz, 23°C bei 1 kHz, 23°C bei 1 MHz, 23°C	6,1 5,88 5,23	IEC 60250 VDE 0303, TI.4
<u>Dissipation factor tan δ :</u> at 50 Hz, 23°C	0,12	IEC 60250 VDE 0303, TI.4
<u>Comparative tracking index:</u>	CTI 600	IEC 60112 VDE 0303, TI.1

Packaging: 5 kg, 10 kg and 30 kg-buckets 250 kg drums

Shelf life: in original closed cans or drums, dry storage between 15°C and 25°C, 6 months.

Our technical advice - whether verbal, in writing or by way of trials - is given in good faith but without warranty, and this also applies where proprietary rights of third parties are involved. It does not release you from the obligation to test the products supplied by us to their suitability for the intended processes and uses. The application, use and processing of the products are beyond our control and therefore, entirely your own responsibility. Should in spite of this occur a case of liability from our side, this will be limited to any damage to the value of the merchandise delivered by us. We will, of course, provide products of consistent quality within the scope of our General Conditions of Sale and Delivery.

## WEVOPUR 552 FL

---

Two-component encapsulating system based on polyurethane.

The resin component contains a mineral filler providing the material with self-extinguish properties. The resin contains no halogenated flame-retardants and is tough elastic. The system is tested by Underwriters Laboratories under the File-No. E108835 at a thickness of 1,5 mm according to UL94V-0. HWI, HAI and CTI-tests are passed with PLC 0, the RTI value is 130°C (mechanical and electrical strength). This product has the all colour recognition.

Temperature range of use: -40°C to +130°C .

The casting resin is used with **WEVONAT 300**

Applications: Encapsulation of electrical components like coils, sensors, capacitors or PCBs.

### Product Specification:

<u>Mixing ratio:</u>	by weight: 100 parts WEVOPUR 552FL: 20 parts WEVONAT 300		
<u>Viscosity (22°C):</u>	WEVOPUR 552FL:	6.000 -	7.000 mPa·s
	WEVONAT 300:	70 -	120 mPa·s
	Mixture:	1.000 -	1.300 mPa·s
<u>Density (22°C):</u>	WEVOPUR 552FL:	1,56 -	1,60 g/cm³
	WEVONAT 300:	1,20 -	1,24 g/cm³
<u>Colour:</u>	WEVOPUR 552FL:	black or as requested	
	WEVONAT 300:	dark brown	
<u>Pot life (250g):</u>	35 - 50 minutes	at room temperature	
	The curing time depends on the temperature, the potlife, the thickness of the layer and the casting volume.		
<u>Curing time:</u>	12 - 24 hours	at room temperature	
<u>Final hardness:</u>	10 - 14 days	at room temperature	

*It is possible to accelerate the potlife and curing time as requested.*



## **Physical Properties:**

<u>Shore-hardness D:</u>	65 - 70	ISO 868, DIN 53505
<u>Tensile strength:</u>	6 N/mm <sup>2</sup>	ISO 527-2
<u>Elongation at break:</u>	62 %	ISO 527-2
<u>Modulus of elasticity:</u>	55 N/mm <sup>2</sup>	ISO 527-2
<u>Thermal conductivity:</u>	0,61 W/m·K	ISO 8894
<u>Glass transition temperature:</u>	15 °C	TMA
<u>Coefficient of Expansion:</u>	58 ppm/K 142 ppm/K	< 10°C, TMA > 20°C, TMA
<u>Thermal class:</u>	B	IEC 60085
<u>Shrinkage after curing:</u>	1 %	
<u>Water absorption:</u>	0,4 %	after 30 days immersion
<u>Flammability:</u>	V-0, 1,5 mm	UL94
<u>Glow wire flammability:</u>	960°C, 3,5mm	IEC 60695-2-1

## **Electrical Properties:**

<u>Dielectric strength:</u>	29 kV/mm	IEC 60243-1 VDE 0303, TI.2
<u>Volume resistance:</u> 23°C/50% r.h.	$5 \cdot 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$	IEC 60093 VDE 0303, TI.30
<u>Surface resistance:</u> 23°C/50% r.h.	$2,8 \cdot 10^{16} \Omega$	IEC 60093 VDE 0303, TI.30
<u>Dielectric constant <math>\epsilon</math>:</u> at 50 Hz, 23°C bei 1 kHz, 23°C bei 1 MHz, 23°C	5,6 4,6 3,7	IEC 60250 VDE 0303, TI.4
<u>Dissipation factor <math>\tan \delta</math>:</u> at 50 Hz, 23°C bei 1 kHz, 23°C bei 1 MHz, 23°C	0,117 0,0842 0,038	IEC 60250 VDE 0303, TI.4
<u>Comparative tracking index:</u>	CTI 600-0.1	IEC 60112 VDE 0303, TI.1

Packaging: 5 kg, 10 kg and 30 kg-buckets 250 kg drums

Shelf life: in original closed cans or drums, dry storage between 15°C and 25°C, 6 months.

Our technical advice - whether verbal, in writing or by way of trials - is given in good faith but without warranty, and this also applies where proprietary rights of third parties are involved. It does not release you from the obligation to test the products supplied by us to their suitability for the intended processes and uses. The application, use and processing of the products are beyond our control and therefore, entirely your own responsibility. Should in spite of this occur a case of liability from our side, this will be limited to any damage to the value of the merchandise delivered by us. We will, of course, provide products of consistent quality within the scope of our General Conditions of Sale and Delivery.

## WEVOPUR 7210 FL

---

Two-component encapsulating system based on polyurethane.

The resin component contains a mineral filler providing the material with self-extinguish properties. The resin contains no halogenated flame-retardants. The system is tested by Underwriters Laboratories under the File-No. E108835 at a thickness of 6 mm according to UL94V-0. HWI, HAI and CTI-tests are passed with PLC 0. The cured polymer exhibits tough properties. The product processes a high thermal distortion temperature.

Temperature range of use: -40°C to +145°C .

The product can be used up to temperatures of 150°C on a short term basis.

The casting resin is used with **WEVONAT 507**

Applications:      Encapsulation of electrical components for medium and high voltage applications.

### Product Specification:

<u>Mixing ratio:</u>	by weight: 100 parts WEVOPUR 7210FL: 43 parts WEVONAT 507		
<u>Viscosity (22°C):</u>	WEVOPUR 7210FL:	7.000 -	8.500 mPa·s
	WEVONAT 507:	15 -	40 mPa·s
	Mixture:	400 -	600 mPa·s
<u>Density (22°C):</u>	WEVOPUR 7210FL:	1,53 -	1,57 g/cm³
	WEVONAT 507:	1,20 -	1,24 g/cm³
<u>Colour:</u>	WEVOPUR 7210FL:	black or as requested	
	WEVONAT 507:	brown	
<u>Pot life (300g):</u>	20 - 35 minutes	at room temperature	
	The curing time depends on the temperature, the potlife, the thickness of the layer and the casting volume.		
<u>Curing time:</u>	12 - 24 hours	at room temperature	
<u>Final hardness:</u>	10 - 14 days	at room temperature	

*It is possible to accelerate the potlife and curing time as requested.*





## **Physical Properties:**

<u>Shore-hardness D:</u>	85 - 90
<u>Tensile strength:</u>	54 N/mm <sup>2</sup>
<u>Elongation at break:</u>	2 %
<u>Modulus of elasticity:</u>	5500 N/mm <sup>2</sup>
<u>Thermal conductivity:</u>	0,55 W/m·K
<u>Glass transition temperature:</u>	85°C
<u>Coefficient of Expansion:</u>	54 ppm/K 151 ppm/K
<u>Thermal class:</u>	B
<u>Shrinkage after curing:</u>	
<u>Water absorption:</u>	0,3 %
<u>Flammability:</u>	V-0, 6 mm
<u>Glow wire flammability:</u>	6mm, 960°C / 825°

## **Test specification:**

ISO 868, DIN 53505
ISO 527-2
ISO 527-2
ISO 527-2
ISO 22007-2:2008
TMA
< 70°C, TMA
> 100°C, TMA
IEC 60085
after 30 days immersion
UL94
IEC 60695-2-12/-13 GWFI/GWIT

## **Electrical Properties:**

<u>Dielectric strength:</u>	34 kV/mm	IEC 60243-1 VDE 0303, TI.2
<u>Volume resistance:</u> 23°C/50% r.h.	$7 \cdot 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$	IEC 60093 VDE 0303, TI.30
<u>Surface resistance:</u> 23°C/50% r.h.	$3 \cdot 10^{17} \Omega$	IEC 60093 VDE 0303, TI.30
<u>Dielectric constant <math>\epsilon</math>:</u> at 50 Hz, 23°C bei 1 kHz, 23°C bei 1 MHz, 23°C	3,7 3,6 3,5	IEC 60250 VDE 0303, TI.4
<u>Dissipation factor <math>\tan \delta</math>:</u> at 50 Hz, 23°C bei 1 kHz, 23°C bei 1 MHz, 23°C	0,01 0,009 0,013	IEC 60250 VDE 0303, TI.4
<u>Comparative tracking index:</u>	CTI 600	IEC 60112 VDE 0303, TI.1

Packaging: 5 kg, 10 kg and 30 kg-buckets 250 kg drums

Shelf life: in original closed cans or drums, dry storage between 15°C and 25°C, 6 months.

Our technical advice - whether verbal, in writing or by way of trials - is given in good faith but without warranty, and this also applies where proprietary rights of third parties are involved. It does not release you from the obligation to test the products supplied by us to their suitability for the intended processes and uses. The application, use and processing of the products are beyond our control and therefore, entirely your own responsibility. Should in spite of this occur a case of liability from our side, this will be limited to any damage to the value of the merchandise delivered by us. We will, of course, provide products of consistent quality within the scope of our General Conditions of Sale and Delivery.

## Preliminary Product Information for WEPESIL casting resin VT 3602 KK, colourless

Unfortunately, no technical data sheet on our WEPESIL casting resin **VT 3602 KK**, colourless, is available at the present time. For your reference **VT 3602 KK** is a 2-pack silicone elastomer with a high optical temperature resistance of > 150°C which makes the product suitable for the potting of power LEDs.

Due to the adjusted mixing ratio of 1 : 1 parts by weight/volume the material is particularly secure to process. Curing takes place at room temperature (14 days until the final properties are reached). Further processing is possible after 24 hours at 20°C, but can be greatly accelerated by applying heat.

### Characteristics

<b>Viscosity</b>	
Component A	1,900 - 2,300 mPas
Component B	1,700 - 2,100 mPas
Mixture	1,800 - 2,200 mPas
<b>Density</b>	
Component A	0.96 – 1.06 g/cm <sup>3</sup>
Component B	0.96 – 1.06 g/cm <sup>3</sup>
Mixture	0.96 – 1.06 g/cm <sup>3</sup>
Shore A hardness	35 - 40
Tracking resistance	600 V based on 225 V
Dielectric strength	40 kV/mm
Coefficient of thermal expansion >-50°C	310 ppm/°C
Pot life of mixture at 18-23 °C [64.4-73.4 °F] (start at 20 °C [68 °F], set-up quantity 500 g)	
Double viscosity	after approx. 4.5 h
Tenfold viscosity	after approx. 5 h
Drying/curing: Reaching of shore hardness	
Set-up quantity 25 g	
125 °C [257 °F]	after 15 min
100 °C [212 °F]	after 30 min
80 °C [176 °F]	after 45 min
60 °C [149 °F]	after 2 – 3 h

## Preliminary Product Information for Wepuran casting compound VU 4445, black

The Wepuran casting compound **VU 4445**, black is a solvent-free 2-pack casting compound based on polyurethane resins (PUR) that is distinguished by a high permanent temperature resistance up to 165 °C and a high thermal conductivity.

### Viscosity at 20°C

(DIN EN ISO 3219, RS 100, M1-050)

Component A	[mPas]	:	22,000 ± 2,000
Component B	[mPas]	:	140 ± 40
Mixture	[mPas]	:	6,000 ± 600

### Density at 20°C

(DIN EN ISO 2811-1)

Component A	[g/cm³]	:	1.77 ± 0.05
Component B	[g/cm³]	:	1.23 ± 0.05
Mixture	[g/cm³]	:	1.68 ± 0.05

### Pot life of mixture

At room temperature

(scheduled quantity 250 g)	[min]	:	30 - 40
----------------------------	-------	---	---------

### Mixing ratio

Component A : Component B = 100 : 14 (parts by weight)

### Curing

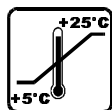
Tack-free 12 - 24 hours, depending upon layer thickness and casting quantity

Final hardness 14 days at room temperature

### Shelf life and storage conditions



shelf life: in sealed original containers at least 6 months



storage conditions: +5°C up to +25°C

### **Physical, mechanical and electrical properties**

Shore D hardness (ISO 868, DIN 53 505)	: 68 ± 5
Tensile strength (DIN 53 455)	: 26 N/mm <sup>2</sup>
Elongation at break (DIN 53 455)	: 15%
Thermal conductivity (DIN VDE 0304, part1):	approx. 0.7 W/(m x K)
Coefficient of expansion (20 – 100 °C)	: approx. 90 x 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
Glass transition temperature(DIN 53 445)	: approx. 50 °C
Temperature index (DIN EN 60 216)	: 165 °C
Water absorption (DIN 53 495, 24 h, 23°C)	: 0.3 %
Dielectric strength (DIN EN 60243-1, VDE 0303, part 21)	: 23 kV/mm
Specific surface resistance (DIN IEC 60093, VDE 0303, part 30)	: 1 x 10 <sup>13</sup> Ohm
Specific volume resistivity (DIN IEC 60093, VDE 0303, part 30)	: 1 x 10 <sup>14</sup> Ohm x cm
Tracking resistance (DIN EN 60 112)	: CTI 600

**TR TECHNICAL  
 REPORT**

Wepesil silicone-rubber  
 casting compound

**VU 4694 E**



**Base: organo-poly-siloxane**

- **white**
- addition cross-linking, thus suitable for application in hermetically encapsulated housings
- good flowability
- high elasticity and tear resistance
- sectile, replacement of components for repair purposes possible
- particularly good thermal conductivity (approx. 0.8 W/mK)
- thermal class 200 = 200 °C [392 °F]

Indices: **VU** = casting compound, opaque  
**E** = elastic

**Contents**


1. General information.....	2	7.4 Manual processing.....	6
2. Application.....	2	7.5 Mechanical processing .....	6
3. Special notes.....	2	8. Drying/Curing .....	6
4. Safety recommendations .....	3	9. Standard packaging .....	6
5. Characteristics.....	3	10. Shelf life and storage conditions .....	6
6. Properties.....	3	11. Further literature/Technical publications .....	7
6.1 General properties .....	3	12. Further products for the production of pcbs.....	7
6.2 Physical and mechanical properties....	4	13. Further products for electronics/ electrical engineering industries.....	7
6.3 Electrical properties.....	4		
7. Processing.....	4		
7.1 Mixing.....	5		
7.2 Viscosity adjustment .....	5		
7.3 Auxiliary products.....	5		



Please read this technical report, the corresponding material safety data sheet and the Technical Information sheets TI 15/2, TI 15/3 and TI 15/10 (see item 4 and 7) carefully before using the product.

## 1. General information

The Wepesil silicone-rubber casting compound **VU 4694 E** is a white, solvent-free, addition cross-linking, 2-pack casting compound based on organo-poly-siloxane that already cures at room temperature.

All symbols that are used in this technical data sheet and on our containers, such as , are explained on our website [www.peters.de](http://www.peters.de) in the section "Service – Technical publications – Label symbols".

## 2. Application

The Wepesil silicone-rubber casting compound **VU 4694 E** is electrically insulating, protects against corrosion caused by extreme environmental impacts and aggressive media as well as against mechanical attack and is temperature resistant up to 200 °C [392 °F]. It was especially developed for the electronics/electrical engineering industries and is used to encapsulate, embed or cast electronic components, assemblies and electrical equipment in order to increase their reliability and life span.

On account of its high elasticity, extremely high temperature stability up to 200° C [392° F] and very low volume and shrinkage pressure, the Wepesil silicone-rubber casting compound **VU 4694 E** is particularly suitable for high-quality, temperature- and shock-sensitive electronic components (e. g. sensors, glass diodes, ferrite cores, etc.) due to the very low heat development during curing and the fact that its elasticity in operation means that material tension resulting from temperature changes is reduced. Further application fields include:

- Components for sensor technology
- Heat sensors, heating elements, cup capacitors, mini and print transformers, cables and cable-end connections
- Magnet, ignition, induction and transformer coils
- HF parts, e.g. high frequency coils, interference filters
- Hybrid integrated circuits
- Elastic coverings for windings, particularly for the coil ends of electromotors exposed to high thermal stress (bar windings)
- Rubber elastic moulding material for various casting resins (pilot lots, prototypes, sample castings)
- Release agent for plastic foaming.

## 3. Special notes

The Wepesil silicone-rubber casting compound **VU 4694 E** is an addition cross-linking silicone-rubber casting compound, that can be used in hermetically encapsulated housings (when using condensation cross-linking silicone-casting compounds low molecular separation products may cause a resoftening (reversion) of the casting compound.).

The Wepesil silicone-rubber casting compound **VU 4694 E** can be used in a temperature range of -40 up to +200 °C [-40 up to 392° F], while at the lower and upper ends of this range the performance and reliability of the material can be negatively affected in some applications. In these cases additional pre-trials and tests are required.

Besides the Wepesil silicone-rubber casting compound **VU 4694 E** a whole range of casting compounds based on polyurethane resin, epoxy resin and silicone-rubber in various colour, viscosity and elasticity adjustments as well as with self-extinguishing properties (UL registered) are available. Special technical reports on these products are available on our website for download.

## 4. Safety recommendations

- Please read the corresponding material safety data sheet where you will find detailed specifications of safety precautions, environmental protection, waste disposal, storage, handling, transport as well as other characteristics.
- When using chemicals, the common precautions should be carefully noted.
- Please read our **Technical Information sheet TI 15/3 "Protective measures when using chemicals including lacquers, casting compounds, thinners, cleaning agents"**. On our website, the technical information sheets can be accessed in the section "Service – Technical publications".

## 5. Characteristics

Colour/appearance		white
Viscosity* at 20 °C [68 °F] ISO 3219	Component A VN 4694 E mixture	5,200 ± 500 mPas 30 ± 10 mPas 4,500 ± 1,000 mPas
Density at 20 °C [68 °F] ISO 2811-1	Component A VN 4694 E mixture	1.43 ± 0.05 g/cm <sup>3</sup> 0.97 ± 0.05 g/cm <sup>3</sup> 1.41 ± 0.05 g/cm <sup>3</sup>
Pot life of mixture at 18 - 23 °C [64.4 – 73.4 °F] (set-up quantity 100 g), viscosity doubled		approx. 2 h

\* measured with Haake RS 600, C 20/1°, D = 50 s<sup>-1</sup>, viscosity measuring unit supplied by:  
Thermo Electron (Karlsruhe) GmbH (formerly Haake-Messtechnik GmbH + Co)  
Dieselstraße 4, 76227 Karlsruhe, Germany  
Phone +49 (0) 721 - 40 94 - 0; Fax +49 (0) 721 - 40 94 - 300  
www.thermo.com

## 6. Properties

The Wepesil silicone-rubber casting compound **VU 4694 E** is distinguished by the following properties:

### 6.1 General properties

- does not contain any substances listed in the RoHS directive 2002/95/EC, the end-of-life vehicle directive 2000/53/EC and the WEEE directive 2002/96/EC
- does not contain any substances listed in the United States' EPA 33/50 program [This program by the EPA (Environmental Protection Agency) aims for a reduction in the use of certain substances that are hazardous to the environment and health.]
- solvent-free, therefore practically no nuisance caused by smell and no attack of solvent-sensitive plastics
- good flowability, thus can also be applied to component geometries that are difficult to access
- addition cross-linking, therefore can be used in hermetically encapsulated housings (no low molecular separation products originate, which may cause a reversion)
- excellent tear resistance
- high elasticity, very low heat development and very low volume shrinkage in the curing phase, thus particularly suitable for casting sensitive components (glass diodes, sensors etc.).
- excellent temperature stability (thermal class 200 = 200 °C [392 °F] based on DIN IEC 60085)
- exceptionally good thermal conductivity (approx. 0.8 W/mK)
- extremely low inclination towards embrittlement, even at temperatures far below freezing point (down to approx. -40 °C [-40 °F])

- in case of electrical breakdowns or combustion of silicone-rubber, no conductive carbon remains but non-conductive silicon dioxide
- excellent dielectric properties: The dielectric constant and the dielectric loss factor  $\tan \delta$  are virtually independent of the temperature and frequency over a wide temperature range
- good protection from shock, impact and vibration
- sectile, allowing replacement of components for repair purposes. Casting can be repeated after replacement has been completed.

## 6.2 Physical and mechanical properties

These properties are reached after 14 days storage at room temperature (18–23 °C [64.4–73.4 °F])

Property	Test method	Result
Shore-A hardness	DIN 53 505	42 ± 5
Water absorption	ISO 62 (24 h/23 °C [73.4 °F])	< 0.1 %
Thermal class	based on DIN IEC 60 085	200 = 200 °C [392 °F]
Coefficient of thermal expansion (CTE)	DIN 53752 -40 bis +180 °C [-40 to 356 °F]	approx. 250 ppm/°C

## 6.3 Electrical properties

These properties are reached after 14 days storage at room temperature (18–23 °C [64.4–73.4 °F])

Property	Test method	Result
Dielectric strength	VDE 0303, part 21 DIN EN 60243-1	44 kV/mm
Surface resistance	VDE 0303, part 30 DIN IEC 60093	$2.0 \times 10^{14}$ Ohm
Specific volume resistivity	VDE 0303, part 30 DIN IEC 60093	$2.1 \times 10^{14}$ Ohm x cm
Moisture and insulation resistance	IPC-TM-650, 2.6.3.4 (65 °C [149 °F]/90 % r. h.)	$2.0 \times 10^{10}$ Ohm
	85/85 test; ramp formed storage at high air moisture and high temperature, amongst others 3 days at 85 °C [185 °F] and 85 % r. h.	$3.0 \times 10^9$ Ohm
Resistance to condensation	based on ISO 6270-2 (BIAS 12 V, 40 °C [104 °F], 100% r. h.)	$1.0 \times 10^{10}$ Ohm
Comparative tracking index (CTI, tracking resistance)	DIN EN 60112	CTI > 600

## 7. Processing

→ Please read our **Technical Information sheet TI 15/2 "Selection criteria and processing advice for casting compounds/resins"** for more detailed information on processing. On our website, you will find the technical information sheets in the section "Service – Technical publications".



**Stir component A before use**





Since the many different permutations make it impossible to evaluate the whole spectrum (parameters, reactions with materials used, chemical processes and machines) of processes and subsequent processes in all their variations, the parameters we recommend are to be viewed as guidelines only that were determined in laboratory conditions. We advise you to determine the exact process limitations within your production environment, in particular as regards compatibility with your specific follow-up processes, in order to ensure a stable fabrication process and products of the highest possible quality.

The specified product data is based upon standard processing conditions/test conditions of the mentioned norms and must be verified observing suitable test conditions on processed printed circuit boards.

Feel free to contact our application technology department (ATD) if you have any questions or for a consultation.

### 7.1 Mixing

The two components are already packed in the correct mixing ratio. The volume of the container of component A is sufficient to accommodate the total quantity of the cross-linker **VN 4694 E** and to allow perfect mixing with component A.

→ Mix both components in the specified mixing ratio (see also item 7.4 "Manual processing"):



**Component A (VU 4694 E): cross-linker (VN 4694 E) = 100 : 4 (parts by weight)**

For stirring we recommend mechanical stirring equipment. For more detailed information on correct mixing please read our **Technical Information sheet TI 15/10: "Processing of 2-pack systems"**. On our website, you will find technical information sheets in the section "Service – Technical publications".



**In order to avoid penetration of moisture as far as possible seal opened containers carefully after use. Use up opened containers as soon as possible.**

### 7.2 Viscosity adjustment

The Wepesil silicone-rubber casting compound **VU 4694 E** must be processed in the condition supplied.



**Do not add solvents or thinners to reduce the viscosity.**

### 7.3 Auxiliary products

- **Grip coating G 4660**

Pre-treatment with grip coating **G 4660**, blue transparent, of the cleaned and degreased base to be potted improves adhesion of addition cross-linking Wepesil silicone-rubber casting compounds. A single application (spreading, spraying, dipping) of the grip coating **G 4660** results in a white, non-adhesive film after drying; in conjunction with the casting compound, this film creates a good adhesive bond.

- **Sealing mastic EH 13.271**

The solvent-free, self-adhesive, permelastical, easily formed and temperature resistant sealing mastic **EH 13.271** is suitable for the sealing of casting moulds and cable outlets.

- **Cleaning agent R 13.780**

For the cleaning of work place and tools we recommend the cleaning agent **R 13.780**. Cleaning should be effected immediately after processing as cleaning becomes increasingly difficult the further the curing process progresses and is impossible after final curing.



**Do not use cleaning agent as a thinner or for washing hands since solvents remove the natural grease from skin.**

Special technical reports on these products are available on our website for download.

#### 7.4 Manual processing

- Choose compound quantity only as large as can be processed within the pot life (see item 5). The viscosity increases considerably during this time so that afterwards the casting compound can no longer be processed.
- While mixing, ensure that no air is stirred in since air inclusions influence the final properties of the casting compound.
- Mix component A and cross-linker VN 4694 E thoroughly.
- In order to remove any possible air inclusions, if possible evacuate the casting compound before or after potting.

#### 7.5 Mechanical processing

When using mixing and dispensing equipment the pot life is irrelevant.

For volumetric mixing and dispensing equipment:

- Since the mixing ratio is indicated in parts by weight, the corresponding quantities to be dispensed must be converted by means of the densities. Note that the densities indicated in item 5 are valid for a temperature of 20 °C [68 °F].

Reliable manufacturers of such equipment can be named upon request.

### 8. Drying/Curing

Drying takes place at room temperature. Curing can be accelerated considerably by applying heat. However, when choosing the temperature, the heat-sensitivity of the item in question must be taken into account. The following specifications for a quantity of 25 g serve as a guideline:

	Room temperature (18 - 23°C [64.4 – 73.4 °F])	60 °C [140 °F]	125°C [257 °F]
Final hardness	24 h	approx. 30 min	approx. 10 min

### 9. Standard packaging

The Wepesil silicone-rubber casting compound **VU 4694 E** is packed for delivery as follows:

Component A	Cross-linker VN 4694 E	Selling unit
1 bucket of 10 kg	1 plastic bottle of 0.4 kg	10.4 kg

Partial lots of the selling unit may be ordered, but will entail surcharges to cover repackaging costs.

### 10. Shelf life and storage conditions

Labels on containers show shelf life and storage conditions.



**Shelf life: In sealed original containers at least 9 months**



**Storage conditions: +5 °C to +25 °C [+41 °F to +77 °F]**



**Protect against humidity**